

Abschlußbericht

Zuverlässigkeit passiver und aktiver Brandschutzmaßnahmen

im Auftrag des

Deutschen Beton Vereins E.V., Wiesbaden

(DBV-Vorhaben Nr. 130)

Dietmar Hosser

Andreas Menzel

August 1991

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

INHALT

	Seite
1 Einleitung	2
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2.1 Zielsetzung der Studie	4
2.2 Wissenschaftliche Ausgangsbasis	5
2.3 Vorgehensweise und Arbeitsschritte	6
3 Fehlerbaumanalyse zur Ermittlung der Teilsysteme	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Die Brandmeldung	10
3.3 Der Raumabschluß	21
3.4 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	34
3.5 Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal	40
3.6 Brandbekämpfung durch Löschhilfeanlagen	44
3.7 Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr	53
3.8 Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr	62
3.9 Brandabschnittsbegrenzung	67
4 Ermittlung der zeitvarianten Versagenswahrscheinlichkeiten der Teilsysteme	69
4.1 Allgemeines	69
4.2 Temperaturbedingtes Versagen passiver Brandschutzmaßnahmen	72
4.3 Temperaturbedingtes Versagen anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen	83
4.4 Temperaturbedingtes Versagen aktiver Brandschutzmaßnahmen	97
4.5 Übergang von der ETK zum Temperatur-Zeitverlauf des Naturbrandes	107
5 Ereignisablaufanalyse	113
5.1 Allgemeines	113
5.2 Berechnungsbeispiel	117
5.3 Ergebnisse	132
6 Zusammenfassende Wertung und Ausblick	148
7 Literaturhinweise	152

1 EINLEITUNG

Der Brandschutz für den Bereich der üblichen Bauwerke basiert auf Erfahrungen, die weit in das Altertum zurückreichen. Hierfür haben sich optimale Maßnahmenkombinationen herauskristallisiert, die als Forderungen im Baurecht verankert sind. Die praktische Umsetzung der Forderungen erfolgt mit der umfangreichen Normenreihe DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen".

Für bauliche Anlagen besonderer Art oder Nutzung wird die sinngemäße Übertragung der Forderung für konventionelle Bauten problematisch, weil ausreichende Erfahrungen fehlen und die Diversität der baulichen Anlagen im Hinblick auf die möglichen Randbedingungen eine Patentlösung nicht gestattet.

Auf Landesebene wird den baulichen Anlagen besonderer Art oder Nutzung durch Sonderverordnungen und Richtlinien Rechnung getragen, die sowohl Erleichterungen und Befreiungen wie auch Verschärfungen und ergänzende Anforderungen gegenüber den allgemeinen Brandschutzforderungen der Landesbauordnungen enthalten.

Hier wird bereits deutlich, daß es für unterschiedliche bauliche Anlagen optimierter Kombinationen von Brandschutzmaßnahmen bedarf, um die Schutzziele des Brandschutzes zuverlässig zu erreichen und das Ausmaß der Brandschäden zu begrenzen.

Bei den Brandschutzmaßnahmen sind zu unterscheiden:

- passive (bauliche) Maßnahmen,
- aktive (abwehrende) Maßnahmen,
- anlagentechnische Maßnahmen,
- betriebliche Maßnahmen.

Als Schutzziele werden in den Bauordnungen der Länder (direkt oder indirekt) definiert:

- der Entstehung und Ausbreitung von Schadenfeuern vorbeugen,
- die Rettung von Mensch und Tier ermöglichen,
- wirksame Löschmaßnahmen ermöglichen und
- einer Gefährdung der Umwelt vorbeugen.

Weitergehende Schutzziele können aus betrieblichen oder versicherungstechnischen Gründen erwogen werden, um eine Schadensminimierung im Brandfall zu erreichen.

Die Erarbeitung einer optimalen Kombination aller Maßnahmen, die außerdem einem Kosten/Leistungsvergleich standhält, entzieht sich oftmals einer rein intuitiven Abschätzung. Mit Hilfe von Zuverlässigkeitsanalysen können verschiedene zur Auswahl stehende Maßnahmenkombinationen untersucht und bewertet werden. Aus Untersuchungen einzelner Maßnahmenbereiche liegen dazu unterschiedliche, meist nur qualitative Bewertungsansätze vor, z. B.:

- Passive bauliche Brandschutzmaßnahmen weisen bei realen Bränden eine relativ hohe Zuverlässigkeit auf.
- Aktive Brandbekämpfungsmaßnahmen werden meist erst nach einer gewissen Verzögerungszeit wirksam und müssen zusätzlich bauliche, technische und personelle Voraussetzungen erfüllen. Besonders die personellen Voraussetzungen unterliegen einer hohen Unzuverlässigkeit.
- Anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen bedürfen einer regelmäßigen Kontrolle und sind im Anforderungsfall nur wirksam, wenn sie ausreichend bemessen und regelmäßig gewartet wurden.

- Betriebliche Maßnahmen werden erst nach Fertigstellung eines Gebäudes notwendig und sind wegen ihrer starken personellen Abhängigkeit sehr unzuverlässig.

2 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

2.1 Zielsetzung der Studie

In dem Forschungsvorhaben sollte die qualitativ unterschiedlich hoch eingestufte Zuverlässigkeit der genannten vier Gruppen von Brandschutzmaßnahmen quantitativ untersucht werden mit dem Ziel einer angemessenen Berücksichtigung bei der vereinfachten brandschutztechnischen Auslegung nach DIN V 18 230 /1/. Im einzelnen wurden folgende Teilziele verfolgt:

- Die Überlegungen zur Zuverlässigkeit passiver Brandschutzmaßnahmen in /2, 3, 4/ sollten ergänzt und verallgemeinert werden. Hierfür sollten Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse für Bauteile bei vorgegebenen Versagenskriterien angewendet werden.
- Unter Berücksichtigung von Erfahrungen und Daten der Feuerwehren und Sachversicherer sollte - in Fortführung der Arbeiten in /5, 6/ - die Zuverlässigkeit der abwehrenden und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen mit Hilfe von Fehlerbaumanalysen nach /3, 7/ untersucht werden.
- Die Berücksichtigung der abwehrenden und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen im Sicherheitskonzept der DIN V 18 230 sollte überdacht werden. Primär sollte geprüft werden, ob die derzeit angenommene Reduktion der Vollbrandhäufigkeit angesichts der ungewissen Voraussetzungen für die Wirksamkeit abwehrender und anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen aufrechterhalten werden kann.

- Weiterhin sollte die Wirksamkeit der Maßnahmen bezüglich einer Begrenzung des Schadenspotentials und der Schadensausbreitung bewertet werden.

Außerdem sollte mit Unterstützung seitens der Feuerwehren und Sachversicherer versucht werden, die noch fehlenden Daten zu Ausfallursachen und -häufigkeiten von abwehrenden und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen - bzw. Angaben zu deren Voraussetzungen - zu beschaffen.

2.2 Wissenschaftliche Ausgangsbasis

Die Zuverlässigkeit passiver und aktiver Brandschutzmaßnahmen wurde bereits in den oben erwähnten früheren Arbeiten des Autors mehr oder weniger systematisch analysiert. Erste Ansätze dazu gab es bereits während der Erarbeitung des Sicherheitskonzeptes der DIN 18 230 /9, 10/ in der zweiten Hälfte der Siebziger Jahre. Zum Teil konnte dabei auf Untersuchungen im SFB 148 /11/ zurückgegriffen werden, die Abschätzungen der Unsicherheiten in der Feuerwiderstandsfähigkeit von Stahlbetonstützen erlaubten. In der Annahme, daß die dafür rechnerisch nach Monte-Carlo-Methode ermittelten statistischen Streuungen von knapp 20 % abdeckend sein müßten für die entsprechenden Unsicherheiten anderer Bauteile, wurden diese Werte auch der Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten γ für die DIN 18 230 in /9/ zugrundegelegt. Etwas später wurden die Untersuchungen dann erweitert und - beschränkt auf Stahlbetonbauteile - mit ersten Ergebnissen zur Versagenswahrscheinlichkeit bei Natur- und Normbränden abgeschlossen /2/. Die Untersuchungsergebnisse sind in die einschlägigen nationalen und internationalen Auslegungskonzepte für den baulichen Brandschutz eingeflossen /12, 13/. In /3/ wurden die noch sehr eingeschränkten Zuverlässigkeitsanalysen baulicher Brandschutzmaßnahmen nochmals aufgenommen und erstmals auch auf Sonder-

bauteile wie Feuerschutzabschlüsse, Brandschutzklappen, Kabelschotts und leichte Trennwände erweitert. Schließlich wurden in /14/ noch die baustoff- und bauteilspezifischen Unterschiede in der Zuverlässigkeit passiver Brandschutzmaßnahmen mit Blickrichtung auf das Sicherheitskonzept der DIN 18 230 bewertet.

Die umfangreiche Studie /3/ beinhaltetete auch bereits systematische Untersuchungen zur Zuverlässigkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen, allerdings mit besonderer Blickrichtung auf Kernkraftwerke. Unter anderem wurden die Brandmeldung, die Brandbekämpfung und die Auslösung sonstiger anlagentechnischer Maßnahmen im Hinblick auf Ausfallraten im Anforderungenfall studiert, wobei sowohl ausländisches als auch inländisches Datenmaterial verwendet wurde.

Auch in bezug auf das Zusammenwirken der unterschiedlichen Brandschutzmaßnahmen in einem brandschutztechnischen Gesamtkonzept wurden vom Autor in /7, 8/ geeignete Analysemethoden erarbeitet, die sich mit entsprechender Modifikation auf beliebige brandschutztechnische Fragestellungen erweitern lassen.

2.3 Vorgehensweise und Arbeitsschritte

Diese vom Umfang her notwendigerweise begrenzte Studie konzentrierte sich - in Abstimmung mit der Beratergruppe - auf zwei Bearbeitungsschwerpunkte:

- 1) Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen zur Zuverlässigkeit passiver und aktiver Brandschutzmaßnahmen; Absicherung und Ergänzung der zugrundeliegenden Datenbasis und Durchführung ergänzender Zuverlässigkeitsanalysen.

- 2) Erarbeitung objektiver Bewertungsgrundsätze für die Auslegung baulicher Brandschutzmaßnahmen sowie für eine Begrenzung von Brandrisiken und -schäden; Analyse der Einflüsse von passiven und aktiven Brandschutzmaßnahmen im Rahmen umfassender, risikoorientierter Bewertungskonzepte.

In Abschnitt 3 werden zunächst die maßgebenden Versagensereignisse für die Fehlerbaumanalyse festgelegt. Allgemeine Ziele einer Fehlerbaumanalyse /15/ sind die systematische Identifizierung aller möglichen Ausfallkombinationen, die zu einem vorgegebenen unerwünschten Ereignis führen, und die darauf folgende Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen, die z.B. die Eintrittshäufigkeit von Ausfallkombinationen des unerwünschten Ereignisses oder die Nichtverfügbarkeit des Systems im Anforderungsfall wiedergeben. Desweiteren wird die Ermittlung der kleinsten Ausfallkombination möglich, die genau so viele Ausfälle enthält, wie zur Erzeugung des unerwünschten Ereignisses nötig ist. Im Rahmen dieser Untersuchung dient die Fehlerbaumanalyse ausschließlich zur systematischen Ermittlung und grafischen Darstellung der Versagensereignisse von Teilsystemen. Die rechnerische Untersuchung erfolgt mit anderen Methoden, weil instationäre Zustände untersucht werden, die sich der klassischen Fehlerbaumanalyse entziehen.

Als unerwünschtes Ereignis wird das "Versagen von Brandschutzmaßnahmen" definiert. Die Voraussetzung für das Eintreten dieses Ereignisses ist die Brandentstehung. In /12/ sind länder- und nutzungsspezifische Zahlen über die Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden wiedergegeben. Für den Industriebau wurde in DIN 18230 /1/ eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $2 \cdot 10^{-6}$ Bränden allgemeiner Art / $[m^2 \cdot \text{Jahr}]$ und von $2 \cdot 10^{-7}$ Vollbränden / $[m^2 \cdot \text{Jahr}]$ festgelegt /9/.

Ereignisse, die ohne das Eintreten des Ereignisses "Brandentstehung" eintreten, sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

Der Fehlerbaum des Gesamtsystems wird in acht funktionale Teilsysteme zerlegt. Die zugehörigen grafischen Darstellungen der Teilfehlerbäume enthalten die Bilder A1 bis A8 im Anhang. Die betrachteten Teilsysteme lauten:

- Brandmeldung,
- Raumabschluß,
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen,
- Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal,
- Brandbekämpfung durch Löschhilfeanlagen,
- Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr,
- Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr,
- Brandabschnittsbegrenzung.

Im Abschnitt 4 werden diejenigen Ereignisse der Fehlerbaumanalyse untersucht, deren Versagenswahrscheinlichkeit keine stationäre Größe darstellt, sondern in Abhängigkeit des Brandverlaufs ermittelt werden muß. Hierzu werden für die einzelnen Ereignisse Widerstände und Einwirkungen festgelegt, die in Grenzfunktionen einander gegenübergestellt werden. Mit Hilfe des Programms FORM (First Order Reliability Method) /16/ werden diese Grenzfunktionen untersucht und in Abhängigkeit von der Zeit Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. Sicherheitsindices für die betreffenden Ereignisse ermittelt.

Anhand eines Beispiels wird in Abschnitt 5 eine Systemanalyse im Zeitschrittverfahren vorgenommen. Dabei werden Versagenswahrscheinlichkeiten des Systems für die einzelnen Zeitschritte unter Zuhilfenahme des Programmpakets SYSREL/CUTALG /17/ ermittelt. Die Ergebnisse werden grafisch aufbereitet und analysiert.

Abschnitt 6 setzt sich zusammenfassend mit den Ergebnissen des entwickelten Modells auseinander und zeigt die wesentlichen Schlußfolgerungen bezüglich der Bewertung aktiver und passiver Brandschutzmaßnahmen auf. Diese sollen noch in einem Aufsatz für die vfdb-Zeitschrift weiter ausgearbeitet werden, um als Diskussionsbeitrag für die bevorstehende Beratung eines neuen Gelbdruckes der DIN 18230 im Frühjahr 1992 dienen zu können.

3 FEHLERBAUMANALYSE ZUR ERMITTLUNG DER TEILSYSTEME

3.1 Allgemeines

Die systematische Identifizierung aller möglichen Ausfallkombinationen setzt die genaue Kenntnis des betrachteten technischen Systems voraus, für das ein Modell entwickelt werden soll. In diesem Modell werden Ereignisse definiert, denen Ausfallwahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Ein Ausfall läßt sich in eine der folgenden Kategorien einteilen /15/:

- primärer Ausfall: Ausfall bei zulässigen Einsatzbedingungen einer Komponente
- sekundärer Ausfall: Folgeausfall bei unzulässigen Einsatzbedingungen einer Komponente
- kommandierter Ausfall: Ausfall trotz funktionsfähiger Komponente infolge falscher oder fehlender Anregung oder Ausfall einer Hilfsquelle.

Ein Primärausfall kann nicht weiter analysiert werden; bei dem Ereignis handelt es sich um ein Funktionselement mit nur einer elementaren Aufgabe. Auf eine weitere Analyse der anderen Ausfallkategorien kann verzichtet werden, wenn die Ausfallfunk-

tion genügend genau erfaßt ist. Die Funktionselemente werden zu Komponenten zusammengefaßt, die die unterste Betrachtungseinheit eines technischen Systems darstellen. Aus den einzelnen Komponenten werden Teilsysteme gebildet, die zusammenhängende Aufgaben innerhalb eines technischen Systems erfüllen. Die Zusammenfassung der Teilsysteme ergibt schließlich das technische System.

Die Verknüpfung der Funktionselemente, Komponenten und Teilsysteme erfolgt in diesem Modell ausschließlich mit den Grundoperatoren der Booleschen Algebra - der "UND"- und der "ODER"-Verknüpfung.

Sofern nichts anderes angegeben wird, ist die Einheit der genannten Versagenswahrscheinlichkeiten: [Versagensfälle / Anforderung].

3.2 Die Brandmeldung

3.2.1 Überblick

Die Entdeckung eines Brandes ist die Voraussetzung für eine Brandmeldung. Die Ereignisse der "Brandentdeckung" und der "Brandmeldung" werden zusammengefaßt, weil eine Detektion noch keinen Einfluß auf andere Systemkomponenten ausübt. Erst die Reaktion der Detektoren mit seinen Auswirkungen auf das System bilden die Grundlage für eine weiterführende Betrachtung.

Die Meldung eines Brandes läßt sich in die Hauptkomponenten direkte und indirekte Brandmeldung gliedern.

Unter der direkten Brandmeldung ist die Meldung aus dem betroffenen Raumbereich bzw. vom überwachten Objekt zu verste-

hen. Die direkte Meldung erfolgt in der Brandentstehungs- oder Brandausbreitungsphase.

Die indirekte Brandmeldung erfolgt aus Nachbarbereichen bzw. Nachbarräumen und durch indirekte Hinweise auf einen möglichen Brand infolge von Ausfall- und Störsignalen aus dem Brandraum oder aus angrenzenden Bereichen in der Vollbrandphase.

Die Hauptkomponenten der Brandmeldung lassen sich in weitere Komponenten zerlegen, welche die Funktionselemente der personellen und der automatischen Brandmeldung beinhalten.

3.2.2 Direkte personelle Brandmeldung

Die Anwesenheit von Betriebspersonal im Brandentstehungsraum bestimmt im wesentlichen die Ausfallwahrscheinlichkeit der personellen Brandmeldung. Die Anwesenheit von Personal ist von der Funktion des betrachteten Raumes und von der Tageszeit abhängig.

Für die Systemanalyse ist im Einzelfall festzulegen, ob im Brandentstehungsraum ständig Personal anwesend ist oder ob dieser Raum nur selten von Personal aufgesucht wird. Für die Produktion im "Mehrschichtbetrieb" sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten der personellen Brandmeldung entsprechend geringer als für die "Einschichtproduktion". Das Verwaltungsgebäude wird im allgemeinen nur tagsüber mit Personal besetzt sein. Manche Gebäude werden von den Hauptproduktionsstätten abgetrennt, weil dort Stoffe lagern, die in ihrer Art und Menge ein gewisses Risiko darstellen. Werden diese Gebäude nur selten von Personal betreten, ist die Versagenswahrscheinlichkeit für die direkte personelle Brandmeldung besonders groß. Für derartige Gebäude wird daher häufig eine automatische Überwachung gewählt oder gar gefordert.

Der Zeitpunkt der direkten personellen Brandmeldung wird von der Reaktion des Personals und von der Funktionsfähigkeit installierter manueller Melder einschließlich deren Bedienung bestimmt. Im Anforderungsfall kann daher die Brandmeldung aus folgenden Gründen verzögert werden:

- kein Melder vorhanden,
- der Melder ist infolge des Brandes ausgefallen,
- der Melder hat einen technischen Defekt,
- der Melder wurde vorsätzlich beschädigt,
- das Personal ist nicht in der Lage, den Melder zu bedienen,
- die Existenz des Melders ist unbekannt,
- der Melder ist infolge des Brandes nicht zugänglich. Das Personal kann infolge der Wärme- und/oder Raucheinwirkung nicht zum Melder vordringen,
- das Personal scheut den Weg zum Melder, da er in der Gegend des Brandherdes liegt (Das gilt insbesondere für die telefonische Meldung, die mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden ist; im Gegensatz zum Drücken des Kopfes beim Druckknopfmelder.),
- die Melderzentrale oder die Verbindung dorthin versagen aus technischen Gründen oder infolge Brandeinwirkung (trotz gesicherter Übertragungswege).

Die Verzögerungszeit wird desweiteren von dem Weg bestimmt, den eine Brandmeldung nehmen wird. Über das Haustelefon muß zunächst eine Zentrale informiert werden, die die Meldung weiterleitet. Ein Druckknopfmelder ist für gewöhnlich direkt mit der betrieblichen oder öffentlichen Feuerwehr verbunden.

In großen Hallen, in denen wenig Personal tätig ist, kann ein sich sehr langsam entwickelnder Entstehungsbrand in einem nicht ständig überwachten Bereich zu einer Verzögerung der direkten personellen Brandmeldung führen. Mit fortschreitendem Brandverlauf wächst allerdings die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Brandes.

Für die Komponente "direkte personelle Brandmeldung" wird nur ein Versagensereignis definiert, dem die Ausfallwahrscheinlichkeiten gemäß Tabelle 3.1 zugeordnet wird. Die dort angegebenen Ausfallwahrscheinlichkeiten beziehen sich definitionsgemäß auf die Brandentstehungs- und Ausbreitungsphase.

In Tabelle 3.1 sind Zahlenwerte der Versagenswahrscheinlichkeiten für die direkte personelle Brandmeldung angegeben. Diese Zahlen wurden im Rahmen einer Literaturstudie /18/ aus Datenmaterial gewonnen, das sich speziell auf amerikanische Kernkraftwerke bezieht (Nuclear Power Plant Fire Protection - Fire Hazard Analysis). Eine Übertragbarkeit auf Industriegebäude scheint gerechtfertigt zu sein, weil sich die Versagenswahrscheinlichkeiten allein auf die Anwesenheitszeit von Personal im Brandraum beziehen und keine länderspezifischen Sicherheitssysteme dafür betrachtet werden müssen. Es wird allerdings davon ausgegangen, daß sich das Personal im Industriebau nicht abweichend von amerikanischem Kernkraftwerkspersonal verhält.

3.2.3 Direkte automatische Brandmeldung

Die direkte automatische Brandmeldung erfolgt durch im Brandraum an der Decke angebrachte Detektoren, die verschiedene physikalische und/oder chemische Brandkenngrößen wie Wärme, Rauch, Flammen oder Gas wahrnehmen. Sie werden nach der Art des Ansprechens der gemessenen Kenngröße in Maximal-, Differenz- oder Differentialmelder unterschieden. Die am häufigsten eingesetzten Melder sind Rauchmelder. Sie werden entsprechend ihrem Arbeitsprinzip in Ionisations-, Durchlicht- und Streulichtmelder eingeteilt. Die ausgewerteten Kenngrößen werden in Signale umgeformt und über Stromleitungen einer zentralen Auswertestelle zugeführt.

Eine direkte automatische Brandmeldung ist auch durch das Auslösen einer Löschhilfeanlage denkbar, soll aber hier nicht

weiter untersucht werden, weil diese Anlagen in der gesonderten Komponente "indirekte automatische Brandmeldung" (Abschnitt 3.2.4) betrachtet werden.

Tabelle 3.1 Zeitinvariante Versagensereignisse der Komponente "direkte personelle Brandmeldung"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Ausfall der direkten personellen Brandmeldung	dauernd anwesende Personen	$1 \cdot 10^{-1}$ ¹⁾
	die überwiegende Zeit anwesende Personen	$8 \cdot 10^{-1}$ ¹⁾
	etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$9,9 \cdot 10^{-1}$ ¹⁾
	nur selten anwesende Personen	1 ¹⁾
¹⁾ aus amerikanischen Daten nach /18/		

Die Alarmgabe eines Brandmelders erfolgt einerseits durch unechte Alarmer und andererseits durch den Anforderungsfall. Unechte Alarmer werden durch Fehlalarmer (Fehlfunktion des Melders, der Übertragungstrecke oder der Zentraleinheit) und durch Täuschungsalarmer (Detektion einzelner Brandkenngrößen, obwohl kein wirklicher Brand vorliegt) ausgelöst. Für den Ausfall im Anforderungsfall spielen unechte Alarmer keine Rolle.

Die Funktionsfähigkeit von Brandmeldern wird durch Umgebungseinflüsse wie Raumhöhe, Luftzirkulation, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und radioaktive Strahlung beeinflusst /5/. Der Melder versagt im Anforderungsfall, wenn die Brandkenngrößen ungenügend und damit nicht detektierbar sind oder wenn Brandkenngrößen in genügendem Maße vorliegen,

aber der Melder zur Detektion der Kenngrößen ungeeignet ist. Ist der Melder ungünstig angebracht, besteht die Möglichkeit, daß seine Anregungsschwelle überhaupt nicht oder erst sehr spät erreicht wird. Durch Dejustierung der Anregungsschwelle des Melders infolge unsachgemäßer Installation kann die Detektion von Brandkenngrößen unmöglich gemacht werden. Bei Arbeiten in der Nähe von Meldern besteht die Möglichkeit der Beschädigung (Anbohren der Minusleitung, Überkleben, mechanische Beschädigung). Räume mit hohem Staubanteil können die Funktionsfähigkeit der Melder stark beeinflussen /6/. Die Funktionsfähigkeit hängt desweiteren von der Nutzungsdauer des Melders ab; durch allgegenwärtige γ -Strahlung werden elektronische Bauteile in ihrer Lebensdauer beeinflußt /5/. Daher ist eine ständige Wartung der Melder und ggf. das Austauschen defekter Melder nötig /6/.

Im Industriebau werden durch Unterzüge häufig Felder gebildet, in denen die Melder installiert werden. Es ist mit einer Verzögerung der Brandmeldung im Anforderungsfall zu rechnen, wenn die Melder nicht in den Feldern, sondern auf den Unterzügen angebracht werden; die Brandkenngrößen sammeln sich nämlich infolge der Thermik zunächst in den Feldern.

Die Brandmelder sind normalerweise nach Anzahl und Typ gleichmäßig im Raum verteilt und zu einer Melderlinie zusammengeschaltet, die als ganzes von einer Brandmeldezentrale überwacht wird. Die Leitungen zu bzw. von den Brandmeldern werden ebenfalls von der Brandmeldezentrale überwacht (z.B. Ruhestromüberwachung); eine Alarmgabe erfolgt, wenn Störungen in der Signalübertragung auftreten. Eine Brandmeldung fällt erst dann aus, wenn das gesamte Meldersystem einschließlich der Zentrale davon betroffen ist, da ein Defekt einzelner Melder nicht die Funktionsfähigkeit der restlichen Melder beeinflußt. Das redundante Vorhalten von zwei Melderlinien erhöht die Sicherheit gegenüber Fehllarmen und kann zum Ansteuern von Brandschutzeinrichtungen genutzt werden, bedarf allerdings

der doppelten Anzahl von Meldern. Bei Ansprechen einer Melderlinie erfolgt zunächst ein Voralarm, der den Betreiber der Anlage auf eine Störung hinweist. Erst wenn die zweite Melderlinie Alarm auslöst, erfolgt die Brandmeldung an die öffentliche Feuerwehr und das Ansteuern der Brandschutzeinrichtungen. Die Signalzischenspeicherung in der Brandmeldezentrale ermöglicht dem Betreiber, den Voralarm erst bei zweimaligem Ansprechen einer Melderlinie auszulösen. Andernfalls wird die auslösende Linie nach einer gewissen Zeit wieder auf Normalbetrieb geschaltet. Die Installation mehrerer Melderlinien mit unterschiedlichen Meldertypen kann sinnvoll sein, wenn sich Brandlasten im Raum befinden, die unterschiedliche Kenngrößen emittieren. Der Ausfall der Stromversorgung betrifft entsprechend seiner örtlichen Ausdehnung alle Komponenten, die vom gleichen Verteiler versorgt werden. Der Ausfall der Brandmeldezentrale betrifft die gesamte Brandmeldeanlage. Aus diesem Grund wird für die Brandmeldezentrale ein besonderer, von allen übrigen Räumen brandschutztechnisch abgetrennter Raum gefordert. Wie Untersuchungen des Verbandes der Sachversicherer (VdS) gezeigt haben /18/, sind die meisten Ausfälle von Brandmeldeanlagen auf Installationsmängel zurückzuführen, die im Anforderungsfall die gesamte Anlage betreffen. Der Ausfall eines einzelnen Melders (nach /18/ optische Rauchmelder : $p_f = 6,3 \cdot 10^{-7}/\text{Std.}$, Ionisationsrauchmelder : $p_f = 2,9 \cdot 10^{-7}/\text{Std.}$) verursacht eine Verzögerungszeit, die von der Installationsdichte der Melder abhängt. Die Verzögerungszeit richtet sich auch nach dem eingesetzten Meldertyp und der Signalverarbeitung (Zischenspeicherung). Rauchmelder, die nach dem Ionisationsprinzip arbeiten, können bereits in der Brandentstehungsphase ansprechen, während Wärmemelders einen Brand erst nach genügender Wärmeeinwirkung detektieren. Bei der Signalzischenspeicherung muß mit einer Verzögerungszeit von max. 1 min gerechnet werden.

Die Ereignisse, die zum Ausfall der Komponente "direkte automatische Brandmeldung" führen können, enthält Tabelle 3.2.

3.2.4 Indirekte personelle Brandmeldung

Ein Brand macht sich im allgemeinen durch Wärme und Rauch im Brandentstehungsraum bemerkbar. Die Brandprodukte wirken entsprechend ihrer physikochemischen Struktur in unterschiedlicher Weise auf den Brandraum und seine Umgebung ein. Der Brand kann außer dem Totalausfall des Gebäudes auch Teilsysteme betreffen, die sich auf weitere Systeme auswirken. Der Ausfall der Energieversorgung wird zum Ausfall diverser anderer Systeme führen, die nicht direkt vom Brand betroffen sind. Dem Betreiber derartiger Systeme wird eine Unregelmäßigkeit auffallen, die zur Brandentdeckung und - sofern das rechtzeitig geschieht - zur Brandmeldung führt.

Tabelle 3.2 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "direkte automatische Brandmeldung"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandmeldeanlage infolge Installationsmängel		$6,99 \cdot 10^{-2} \text{ }^1)$
Versagen der Brandmeldeanlage infolge unbekannter Einflüsse		$0,89 \cdot 10^{-2} \text{ }^1)$
Anregungsschwelle der Melder nicht erreicht	Rauchmelder	$1 \cdot 10^{-5} \text{ }^2)$
	Flammenmelder	$2 \cdot 10^{-5} \text{ }^2)$
	Wärmemelder	$1 \cdot 10^{-5} \text{ }^2)$
	Gasmelder	$3 \cdot 10^{-5} \text{ }^2)$
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandmeldeanlage infolge Brandeinwirkung		- ³⁾
¹⁾ aus VdS-Überprüfung nach /18/ ²⁾ eigene Schätzung; bei Zusammenwirken mehrerer Meldertypen darf der kleinere Wert halbiert und als Versagenswahrscheinlichkeit in Ansatz gebracht werden ³⁾ vgl. Abschnitt 4.3		

Analog zur direkten personellen Brandmeldung sind Überlegungen über die Auswirkung der Anwesenheit von Personal auf eine Branderkennung anzustellen. Eine indirekte Brandmeldung kann auch durch die Nachbarschaft eines brennenden Industriebetriebes erfolgen, wenn Brandnebenwirkungen wie Rauch oder Flammen aus dem Gebäude dringen.

Entscheidend für die Wahrnehmung eines Brandes wird das Auftreten genügender Brandnebenwirkungen sein. Mit zunehmender Brandentwicklung werden auch die Brandnebenwirkungen zunehmen, wodurch sich auch die Wahrscheinlichkeit der Brandentdeckung erhöht. Über die zeitlichen Kennwerte der Meldung können keine spezifischen Werte angegeben werden. Es ist davon auszugehen, daß der Brand schon ein gewisses Stadium erreicht haben muß, bevor Nebenwirkungen außerhalb des Brandraumes bemerkt werden. Daher wird für die indirekte Brandmeldung die Vollbrandphase unterstellt.

In /18/ sind Werte für die Versagenswahrscheinlichkeit der personellen Brandmeldung in Abhängigkeit der Anwesenheit von Personal im Raumbereich angegeben. Diese Werte beinhalten auch die mögliche Brandmeldung aus dem Brandraum, die bereits in Abschnitt 3.2.1 untersucht wurde und deren Erhöhung für die Vollbrandphase nicht gerechtfertigt zu sein scheint. Daher werden die in /18/ genannten Werte entsprechend der Versagenswahrscheinlichkeit der direkten personellen Brandmeldung mit Gleichung 3.2 reduziert. Die errechneten Wahrscheinlichkeiten enthält die Tabelle 3.3.

Aus dem Additionssatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung für unabhängige, sich gegenseitig ausschließende Ereignisse

$$(1 - p_{f,Gesamt}) = (1 - p_{f,direkt}) + (1 - p_{f,indirekt}) - (1 - p_{f,direkt}) \cdot (1 - p_{f,indirekt}) \quad (3.1)$$

folgt

$$P_{f,\text{indirekt}} = P_{f,\text{Gesamt}} / P_{f,\text{direkt}} \quad (3.2)$$

mit

$P_{f,\text{Gesamt}}$ - Gesamtversagenswahrscheinlichkeit

$P_{f,\text{direkt}}$ - Versagenswahrscheinlichkeit der direkten personellen Brandmeldung

$P_{f,\text{indirekt}}$ - Versagenswahrscheinlichkeit der indirekten personellen Brandmeldung

3.2.5 Indirekte automatische Brandmeldung

Die indirekte Brandmeldung erfolgt entweder von Nebenräumen, in denen automatische Brandmelder installiert sind, oder durch Störmeldungen bzw. Ausfallsignale von Komponenten anderer Systeme, die in irgendeiner Weise mit dem Brandraum in Verbindung stehen. Auch die automatische Auslösung der Löschhilfesanlage mit zusätzlicher Meldung an eine Brandmeldezentrale ist dazu zu zählen.

Für die Meldung durch Brandmelder muß mit einer Verzögerungszeit gegenüber der "direkten automatischen Brandmeldung" gerechnet werden, die von der Dichtigkeit der raumabschließenden Bauteile sowie der Stellung der Feuerschutzabschlüsse bestimmt wird. Eine Brandmeldung aus Nebenräumen kann ausfallen, wenn Komponenten des Meldersystems im Nebenraum von Komponenten der Anlage im Brandraum abhängig sind.

Die Verzögerungszeit, die sich aus dem Ausfall anderer Systeme ergibt, unterliegt einer großen Streuung. Der Ausfall kann schnell bemerkt werden, wenn es sich um wichtige Versorgungsleitungen handelt. Teilweise wird die Funktionsfähigkeit solcher Systeme derart überwacht, daß eine Fehlfunktion schnell lokalisierbar ist. Die Verzögerungszeit wächst gegen Unendlich, wenn es sich bei dem Brandraum um einen autonomen Raum handelt.

Tabelle 3.3 Zeitinvariante Versagensereignisse der Komponente "indirekte personelle Brandmeldung"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Ausfall der indirekten personellen Brandmeldung	dauernd anwesende Personen	$0,1 \cdot 10^{-1} \text{ }^1)$
	die überwiegende Zeit anwesende Personen	$0,25 \cdot 10^{-1} \text{ }^1)$
	etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$2,02 \cdot 10^{-1} \text{ }^1)$
	nur selten anwesende Personen	$5 \cdot 10^{-1} \text{ }^1)$
¹⁾ modifizierte amerikanische Daten nach /18/		

In /18/ wird die Versagenswahrscheinlichkeit der "indirekten automatischen Brandmeldung" bei Vollbrand mit $2 \cdot 10^{-1}$ angegeben. Da die Herkunft dieser Versagenswahrscheinlichkeiten nicht näher erläutert wird, werden die Wahrscheinlichkeiten für das zeitinvariante Versagen der Brandmeldeanlage aus Abschnitt 3.2.2 übernommen. Die Anregungsschwelle der Melder wird mit größerer Wahrscheinlichkeit nicht erreicht. Die zeitabhängige Versagenswahrscheinlichkeit wird gegenüber der Komponente "direkte automatische Brandmeldung" ebenfalls ansteigen. Für Störmeldungen und Ausfallsignale von Komponenten und Systemen im Brandraum wird der in /18/ angegebene Wert weiter modifiziert. Angegeben ist dort eine Versagenswahrscheinlichkeit von 0,6. Diese wird für einen autonomen Raum übernommen. Für überwachte Systeme wird eine geringere Versagenswahrscheinlichkeit gewählt. Eine möglicherweise zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit wird hierfür nicht berücksichtigt.

3.3 Der Raumabschluß

3.3.1 Allgemeines

Brandabschnitte werden nach bauaufsichtlichen Vorschriften durch die Anordnung von Brandwänden im Abstand von höchstens 40 m gebildet. Der Begriff des "Brandbekämpfungsabschnittes" wird in DIN 18230 /1/ definiert, um den Erfordernissen nach größeren Brandwandabständen im Industriebau gerecht zu werden. Im folgenden soll daher der Begriff des "Brandbekämpfungsabschnittes" verwendet werden, obwohl gleiches auch für den Brandabschnitt gelten würde.

Brandbekämpfungsabschnitte können in kleinere Zellen (Brandzellen) unterteilt werden /19/, an deren Umfassungsbauteile geringere brandschutztechnische Anforderungen gestellt werden (vgl. Abschnitt 3.9). Als Brandzellen gelten nach /19/ Unterteilungen der Brandbekämpfungsabschnitte von höchstens 200 m² Grundfläche mit Feuerwiderstandswerten von mindestens F 30/T 30. Das ungehinderte Ausbreiten des Brandes wird durch die Zellenbildung in horizontaler und vertikaler Richtung verhindert oder zumindest längere Zeit verzögert.

Im Hinblick auf die Möglichkeit und den Bedarf, in größeren Hallen einzelne Produktions- oder Lagerstätten räumlich voneinander zu trennen, die trennenden Bauteile jedoch nicht in dem Maße brandschutztechnisch bemessen zu müssen wie die übrige Hallenkonstruktion, soll in diesem Abschnitt der Raumabschluß von Brandzellen untersucht werden. Unter dem Begriff "Raumabschluß" ist daher ein gegenüber anderen Räumen brandschutztechnisch abgeschlossener Raum eines Brandbekämpfungsabschnitts zu verstehen.

Die Größe eines Raumes ist für die Beurteilung der Funktionsfähigkeit raumabschließender Bauteile von untergeordneter Bedeutung. Es existiert allerdings ein Zusammenhang zwi-

schen Raumgröße, Brandausbreitungsmöglichkeit und Wirksamkeit von Löschmaßnahmen. Dieser Zusammenhang wird in den einzelnen Teilsystemen der Brandbekämpfungsmaßnahmen bzw. Abschnitt 4 näher untersucht.

In DIN 4102, Teil 2 /20/ werden brandschutztechnische Begriffe, Anforderungen und Prüfungen für Bauteile festgelegt. Als Bauteile im Sinne dieser Norm gelten Wände, Decken, Stützen, Unterzüge, Treppen usw.

Tabelle 3.4 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "indirekte automatische Brandmeldung"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandmeldeanlage des Nebenraums infolge Installationsmängel		$6,99 \cdot 10^{-2} \text{ }^1$
Versagen der Brandmeldeanlage des Nebenraums infolge unbekannter Einflüsse		$0,89 \cdot 10^{-2} \text{ }^1$
Anregungsschwelle der Melder im Nebenraum nicht erreicht	Rauchmelder	$1 \cdot 10^{-2} \text{ }^5$
	Flammenmelder	$5 \cdot 10^{-1} \text{ }^5$
	Wärmemelder	$5 \cdot 10^{-2} \text{ }^5$
	Gasmelder	$5 \cdot 10^{-2} \text{ }^5$
keine Meldung an die Brandmeldezentrale über die Löschhilfeanlage		$1 \cdot 10^{-3} \text{ }^2$
kein Ausfall oder keine Störsignale von Systemen bzw. Störsignale nicht bemerkt	Systeme, die ständig überwacht werden	$1 \cdot 10^{-3} \text{ }^2$
	Systeme, die nicht überwacht werden, aber vom Brandraum abhängig sind	$1 \cdot 10^{-1} \text{ }^2$
	autonomer Brandraum	$6 \cdot 10^{-1} \text{ }^3$
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandmeldeanlage infolge Brandeinwirkung		- 4
¹⁾ aus VdS-Überprüfung nach /18/ ²⁾ eigene Schätzung ³⁾ aus amerikanischen Daten nach /18/ ⁴⁾ vgl. Abschnitt 4.3 ⁵⁾ eigene Schätzung; bei Zusammenwirken mehrerer Meldertypen darf der größere Wert halbiert oder der kleinere Wert voll als Versagenswahrscheinlichkeit in Ansatz gebracht werden		

Wände werden nach DIN 4102 in nichttragende und tragende Wände, in raumabschließende und nichtraumabschließende Wände eingestuft und müssen entsprechend ihrer Funktion bestimmte Prüfanforderungen und Einbaubedingungen erfüllen.

Raumabschließende Bauteile (Wände, Decken und Böden) dienen zur Verhinderung der Brand- und Rauchübertragung von einem Raum zum anderen. Sie werden entsprechend ihrer Funktion nur einseitig vom Brand beansprucht und müssen mindestens der Feuerwiderstandsklasse F 30 nach DIN 4102, Teil 2 angehören.

Bauteile wie Feuerschutzabschlüsse, die wegen abweichender Anforderungen nicht in die Feuerwiderstandsklassen F 30 - F 180 nach DIN 4102, Teil 2 eingestuft werden können, werden den Sonderbauteilen zugeordnet. Die Sonderbauteile werden nach ihrer Funktion in Gruppen zusammengefaßt. Sonderbauteile, die keine Türen, Klappen und dgl. zum Öffnen und Schließen besitzen, werden als feststehende Sonderbauteile bezeichnet. Zu den Sonderbauteilen, die den Raumabschluß betreffen oder deren Brandverhalten sich auf raumabschließende Bauteile auswirkt, gehören :

- Brandwände und nichttragende Außenwände (DIN 4102, Teil 3)
- Feuerschutzabschlüsse, Abschlüsse in Fahrschachtwänden und gegen Feuer widerstandsfähige Verglasungen (DIN 4102, Teil 5)
- Lüftungsleitungen (DIN 4102, Teil 6)
- Bedachungen (DIN 4102, Teil 7)
- Kabelabschottungen (DIN 4102, Teil 9)

- Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Abschlüsse ihrer Revisionsöffnungen (DIN 4102, Teil 11)
- Brandschutzverglasungen (DIN 4102, Teil 13)

An Brandwände werden gegenüber den raumabschließenden Bauteilen erhöhte Anforderungen gestellt. Ihre Berücksichtigung erfolgt im Teilsystem "Brandabschnittsbegrenzung" (Abschnitt 3.9).

Der Funktionserhalt des Raumabschlusses ist nicht allein von der Feuerwiderstandsdauer der raumabschließenden Bauteile abhängig. Die notwendigen Durchbrüche in den raumabschließenden Bauteilen stellen in der Regel die brandschutztechnischen Schwachstellen dar. Vor allem die Stellung der Feuerschutzabschlüsse (T 30 - T 120) hat maßgebenden Einfluß auf den Raumabschluß. Feuerschutzabschlüsse müssen daher in der Regel selbstschließend ausgeführt werden. Rohrleitungen und gebündelte elektrische Leitungen werden in sogenannten Abschottungen durch die raumabschließenden Bauteile geführt. Kabelabschottungen werden den Feuerwiderstandsklassen S 30 - S 180, Verglasungen den Feuerwiderstandsklassen G 30 - G 180, Rohrleitungen und Installationsschächte bzw. -kanäle den Feuerwiderstandsklassen R 30 - R 120 bzw. I 30 - I 120 nach DIN 4102 zugeordnet. Die Feuerwiderstandsdauer dieser Sonderbauteile muß mindestens der der raumabschließenden Bauteile entsprechen, weil das Versagen des Raumabschlusses voraussichtlich an der schwächsten Stelle seinen Ausgang nehmen wird. Auffallend ist hier, daß Rohrleitungen und Installationsschächte bzw. -kanäle maximal eine klassifizierte Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten erreichen können, während raumabschließende Bauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 180 Minuten klassifiziert werden.

Als Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils wird jene Zeit verstanden, während der ein Bauteil im Normbrandversuch nach DIN 4102 in keinem Prüfkriterium versagt hat. Die ermittelte Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils basiert auf der Auswertung von (mindestens) zwei Prüfungen. Die Beurteilung erfolgt nach verschiedenen Kriterien. Das ungünstigste Ergebnis dieser Normbrandversuche ergibt die Feuerwiderstandsdauer, die zur Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse führt. Aus der Klassifizierung der Feuerwiderstandsdauern ergeben sich gewisse Reserven des Bauteils. In DIN 18230 wird daher eine 10%-Fraktile der Feuerwiderstandsdauer angenommen. Inwiefern diese Annahme für die Systemanalyse verwertbar ist, wird in Abschnitt 4 näher untersucht. Zu beachten ist, daß auch der Herstellungsprozeß gewisse Unsicherheiten in sich birgt, die von der Herstellerfirma bei Normbrandversuchen weitgehend ausgeschlossen werden können. Zur Erlangung des Prüfzeugnisses wird eine Firma kaum daran interessiert sein, mehr als zwei Bauteile prüfen zu lassen. Zum einen ist eine Prüfung sehr kostenintensiv und zum anderen wächst mit zunehmender Anzahl von Prüfungen die Wahrscheinlichkeit, daß ein einzelnes Bauteil die angestrebte Feuerwiderstandsdauer bzw. -klasse nicht erreicht. Die Bauteile müssen in allen Einzelheiten konstruiert werden, um im Normbrandversuch alle Prüfkriterien zu erfüllen. Besonders bei Bauteilen, die für geringere Feuerwiderstandsklassen vorgesehen sind, werden einzelne Details überdimensioniert, weil damit die Feuerwiderstandsdauer der Konstruktion relativ einfach und kostengünstig positiv beeinflusst werden kann. Andere Details werden so dimensioniert, daß sie im Versuch gerade die angestrebte Feuerwiderstandsdauer erreichen. Mit zunehmender Anforderung an den Feuerwiderstand wird davon ausgegangen, daß diese Praxis der brandschutztechnischen Konstruktion verloren geht und die einzelnen Komponenten eine gleichmäßigere, aber natürlich immer noch streuende Feuerwiderstandsdauer aufweisen, um die erhöhten Prüfkriterien zu erfüllen.

Die äquivalente Branddauer dient in DIN 18230 zur Ermittlung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen. Sie entspricht der Zeitdauer, bei der im Normbrandversuch nach DIN 4102 näherungsweise dieselbe Brandwirkung in einem betrachteten Bauteil erreicht wird wie im natürlichen Schadensfeuer. Die Berechnung der äquivalenten Branddauer erfolgt aus der rechnerischen Brandbelastung unter Berücksichtigung der Wärmeabzugsverhältnisse und des Wärmeeindringverhaltens der Umfassungsbauteile.

In DIN 18230 werden gemäß den unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen, die für die Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer an einzelne Bauteile gestellt werden, drei Brandsicherheitsklassen definiert (SK_b 1 bis SK_b 3). In Abhängigkeit der Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes (Summe der Geschoßflächen), der Anzahl der Geschosse und der Brandsicherheitsklasse werden Sicherheitsbeiwerte festgelegt (Sicherheitsbeiwert γ und Zusatzbeiwert γ_{nb}), die aus der äquivalenten Branddauer zur Ermittlung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer für die Bauteile der einzelnen Brandsicherheitsklassen führen.

Aus der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer für Bauteile der Brandsicherheitsklasse SK_b 3 wird für jeden einzelnen Brandbekämpfungsabschnitt die Brandschutzklasse bestimmt. Über die fünf in DIN 18230 definierten Brandschutzklassen hinaus können höhere Feuerwiderstandsdauern der Bauteile gefordert werden, wenn besondere Risiken zu berücksichtigen sind.

Bei der Systemanalyse sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden: die Überprüfung bestehender Normen und die brandschutztechnische Beurteilung geplanter oder bestehender Gebäude. Daher muß im konkreten Fall entschieden werden, wie die Feuerwiderstandsdauern raumabschließender Bauteile festzulegen sind. Bezüglich DIN 18230 werden sich allerdings Pro-

bleme ergeben, wenn die Frage zu klären ist, welche Anforderungen an raumabschließende Bauteile zu stellen sind. Eine Zuordnung raumabschließender Bauteile zu Bauteilen ohne brandschutztechnische Bedeutung (innere nichttragende Trennwände) scheint für die Systemanalyse nicht gerechtfertigt zu sein, da auch nichttragende Wände wie eingangs erläutert in jedem Fall einer Brandausbreitung entgegenwirken. Hier muß allerdings der Zweck der DIN 18230 berücksichtigt werden. Die Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen eines Brandbekämpfungsabschnittes wird ermöglicht mit dem Ziel, ein Versagen der tragenden Konstruktion mit angemessener Wahrscheinlichkeit zu verhindern.

3.3.2 Raumabschließende Bauteile und feststehende Sonderbauteile

Die durch Produktionsänderungen oftmals erforderlich werdende Nachinstallation von Rohrleitungen, E-Leitungskanälen, etc. beeinträchtigt die geforderte und zunächst erfüllte Feuerwiderstandsdauer der raumabschließenden Bauteile. Das dauerhafte Schließen der erforderlichen Durchbrüche wird brandschutztechnisch häufig nur mangelhaft ausgeführt. Daher muß bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit der Bauteile mit folgenden Unsicherheiten gerechnet werden:

- Fehler bei der Herstellung der Bauteile,
- nachträgliche Modifikation der Bauteile,
- Unterschreiten der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen,
- übermäßige Temperatur- oder Stoßbeanspruchung.

Das Versagen der Komponente der raumabschließenden Bauteile und feststehenden Sonderbauteile wird ausschließlich in Abhängigkeit von der äquivalenten Branddauer bestimmt. Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt in Abschnitt 4.

Tabelle 3.5 Zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "raumabschließende Bauteile und feststehende Sonderbauteile"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der Bauteile durch Brandeinwirkung	Holzbauteile	- 1)
	Stahlbauteile	- 1)
	Stahlbetonbauteile	- 1)
Versagen der feststehenden Sonderbauteile durch Brandeinwirkung	leichte Trennwände	- 2)
	Kabelabschottungen	- 2)
1) vgl. Abschnitt 4.2.3		2) vgl. Abschnitt 4.2.2

3.3.3 Feuerschutzabschlüsse

Feuerschutzabschlüsse sind selbstschließende Bauteile, die in eingebautem und geschlossenem Zustand den Durchtritt von Feuer verhindern, sowie die Ausbreitung von Rauch behindern. Hieraus geht bereits hervor, daß sie dem Feuer im geöffneten Zustand keinen Widerstand entgegensetzen. Für den Brandverlauf und damit die zu erwartenden Temperaturen ist die Stellung der Türen, Tore und Klappen im Brandfall von entscheidender Bedeutung. Die Ventilationsverhältnisse sowie der mögliche Brandverlauf werden dadurch entscheidend beeinflußt.

Klappen im Sinne von Feuerschutzabschlüssen sind kleinformatige Türen, die als selten betätigte Abschlüsse zu Kontrollzwecken z.B. in Öllagern eingebaut werden. Hierbei handelt es sich nicht um Brandschutzklappen in Lüftungsleitungen, an die nach DIN 4102, Teil 6 besondere Anforderungen gestellt werden (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Um die Produktion nicht übermäßig zu behindern, werden oft Türen etc. eingebaut, die im Normalfall ständig geöffnet sind und erst im Brandfall geschlossen werden. Die Schließvorrichtung ist in der Regel mit separaten Brandmeldern verbunden, die von der Brandmeldeanlage des Raumes unabhängig sind. Türen werden beispielsweise durch Elektromagnete offen gehalten, deren Stromkreis im Brandfall unterbrochen wird (Fail-Save-Prinzip bei Stromausfall). Abschlüsse von Förderanlagen, die im Normalbetrieb ständig geöffnet sind, können über Schmelzlotauslöser gesteuert werden. Im Brandfall benötigen sie in Abhängigkeit der Ventilationsverhältnisse (Zuluft- oder Abluftkanal) eine gewisse Zeit zur Auslösung.

Auch bei bestimmungsgemäßem Gebrauch von Feuerschutzabschlüssen können an festen oder beweglichen Teilen Störungen durch Verschleiß, Bruch, Verformung oder Rißbildung auftreten, wodurch das selbsttätige Schließen oder eine ausreichende Verriegelung auf Dauer nicht sichergestellt wird.

Dauernd geschlossene Feuerschutzabschlüsse

Das Versagen der Bauteile wird bei ordnungsgemäßem Gebrauch im wesentlichen von ihrer Feuerwiderstandsdauer abhängen. Die Stellung dauernd geschlossener Brandschutztüren im Anforderungsfall ist auch von der Häufigkeit der Begehung und der Tätigkeiten im zu untersuchenden Raum abhängig. Das Versagen wird entscheidend beeinflusst, wenn aus Bequemlichkeit die Türen verkeilt werden, der Schließbereich der Türen durch Produktionsgüter zugelagert wird oder infolge mangelhaftem Einbau

die raumabschließende Funktion nicht erfüllt werden kann. Durch häufiges Öffnen und Schließen der Feuerschutzabschlüsse ist mit einem größeren Verschleiß der festen und beweglichen Teile gegenüber dauernd geöffneten Feuerschutzabschlüssen zu rechnen. Diese Tatsache wird ausschließlich dem technischen Versagen zugeordnet. Eine Berücksichtigung beim Versagen infolge Brandeinwirkung erfolgt nicht (Dichtungen, etc.).

Tabelle 3.6 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "dauernd geschlossene Feuerschutzabschlüsse"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
technisches Versagen dauernd geschlossener Feuerschutzabschlüsse	selten begangen	$1 \cdot 10^{-2} \text{ } ^1)$
	häufig begangen	$2 \cdot 10^{-2} \text{ } ^1)$
Versagen durch Verkeilen oder Zulagern dauernd geschlossener Feuerschutzabschlüsse	selten begangen	$0,5 \cdot 10^{-1} \text{ } ^2)$
	häufig begangen	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^2)$
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen dauernd geschlossener Feuerschutzabschlüsse infolge Brandeinwirkung		- $\text{ } ^3)$
$\text{ } ^1)$ eigene Schätzung $\text{ } ^2)$ aus Expertenangaben nach /18/ $\text{ } ^3)$ vgl. Abschnitt 4.2.2		

Dauernd geöffnete Feuerschutzabschlüsse

Das Versagen der Bauteile wird ebenso wie bei den dauernd geschlossenen Feuerschutzabschlüssen von der Feuerwiderstandsdauer und von unsachgemäßem Ein- oder Umbau bestimmt. Darüber hinaus muß bei den dauernd geöffneten Feuerschutzabschlüssen die Schließvorrichtung untersucht werden. Ein Verkeilen der

selbstschließenden Feuerschutzabschlüsse wird nicht berücksichtigt, weil der Aspekt des häufigen Öffnens und Schließens durch die Festhaltevorrichtung entfällt. Dies führt auch dazu, daß die Versagenswahrscheinlichkeit infolge Verschleiß an festen und beweglichen Teilen reduziert werden kann. Das Zulagern des Schließbereichs der Türen kann jedoch nicht vernachlässigt werden; unbedacht im Schließbereich abgestellte Produktionsgüter führen zum Versagen der Abschlüsse.

Die raumabschließende Funktion des Bauteils versagt, wenn im geöffneten Zustand keine Auslösung der automatischen Schließvorrichtung erfolgt. Die Auslösung der Schließvorrichtung versagt, wenn keine Brandmeldung erfolgt oder die Rückmeldung von den separaten Brandmeldern an die Schließvorrichtung ausbleibt. Desweiteren tritt ein Versagen ein, wenn Komponenten der Schließvorrichtung infolge des Brandes oder aus technischen Gründen ausfallen. Nach /18/ erfolgt die Detektion durch die Brandmelder sehr zuverlässig. Da allerdings für gewöhnlich nur ein einzelner Melder einen Feuerschutzabschluß steuert, ist die Kenntnis der Ausfallwahrscheinlichkeit dieses Melders sehr bedeutend. Hierfür wird ein in /18/ genannter Schätzwert für die Ausfallwahrscheinlichkeit normaler Rauchmelder gewählt. Dieser Wert wurde aus verschiedenen Herstellerangaben ermittelt; die von den einzelnen Herstellern genannten Ausfallwahrscheinlichkeiten lagen um eine Zehnerpotenz auseinander. Bei Brandmeldeanlagen führt der Ausfall eines einzelnen Melders lediglich zu einer Verzögerung der Brandmeldung. Bei Feuerschutzabschlüssen führt der Ausfall des Melders allerdings zum Versagen des Raumabschlusses, sofern keine manuelle Schließung erfolgt. Das Versagen der Schließvorrichtung wird in /18/ ausdrücklich unabhängig vom Ausfall der Brandmeldung angegeben. Dieser aus Befragungen von Brandschutzexperten gewonnene Wert wird übernommen. Für das manuelle Schließen der Abschlüsse kann analog der direkten Brandmeldung deren Versagenswahrscheinlichkeit angenommen werden. Das Fehlver-

halten des Betriebspersonals infolge Streßsituation im Brandfall wird dabei allerdings vernachlässigt.

Tabelle 3.7 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "dauernd geöffnete Feuerschutzabschlüsse"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
technisches Versagen dauernd geöffneter Feuerschutzabschlüsse		$1 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾
Versagen durch Zulagern des Schließbereichs dauernd geöffneter Feuerschutzabschlüsse		$1 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾
technisches Versagen der Melder der Schließvorrichtung		$4,3 \cdot 10^{-3}$ ²⁾
technisches Versagen der Schließvorrichtung		$1 \cdot 10^{-2}$ ³⁾
keine manuelle Auslösung der Festhaltevorrichtung	dauernd anwesende Personen	$1 \cdot 10^{-1}$ ⁴⁾
	die überwiegende Zeit anwesende Personen	$8 \cdot 10^{-1}$ ⁴⁾
	etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$9,9 \cdot 10^{-1}$ ⁴⁾
	nur selten anwesende Personen	1 ⁴⁾
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen dauernd geöffneter Feuerschutzabschlüsse infolge Brandeinwirkung		- ⁵⁾
¹⁾ eigene Schätzung ²⁾ Schätzwert für Herstellerangaben nach /18/ ³⁾ aus Expertenangaben nach /18/ ⁴⁾ aus amerikanischen Daten nach /18/ ⁵⁾ vgl. Abschnitt 4.2.2		

3.3.4 Lüftungsabschluß des Raumes

Lüftungsleitungen verlaufen oftmals durch mehrere Brandbekämpfungsabschnitte eines Gebäudes. Die Weiterleitung von Rauch und Wärme in andere Brandbekämpfungsabschnitte, selbst solche, die nicht direkt an den Brandentstehungsabschnitt angrenzen, wird durch die gerichtete Luftströmung in diesen Kanälen

besonders leicht ermöglicht, wenn keine Absperrvorrichtungen eingebaut sind. Zum Verschluß durchströmter Leitungsquerschnitte dienen im Brandfall selbsttätig schließende Brandschutzklappen, deren Steuerung auch von einer Zentrale erfolgen kann. Im Gegensatz zu den Feuerschutzabschlüssen werden Brandschutzklappen aufgrund der Zwangsventilation unter erhöhten Druckverhältnissen geprüft und nach DIN 4102, Teil 6 in die Feuerwiderstandsklassen K 30 bis K 90 eingeteilt.

Die Zustände "Brandschutzklappe geöffnet" und "Brandschutzklappe geschlossen" können durch elektrische Anlagen überwacht werden. Das automatische Schließen im Anforderungsfall erfolgt selbsttätig über Schmelzlotauslöser oder zusätzlich über Auslöseeinrichtungen, die von der Brandmeldezentrale angesteuert werden. Die Ansprechtemperatur von Schmelzloten liegt bei ca. 70 - 90 °C. Die Auslösung über Schmelzloten ist von den Ventilationsverhältnissen und der Temperaturentwicklung im Brandraum abhängig. Handelt es sich bei der Lüftungsleitung um einen Abluftkanal, werden die heißen Brandgase relativ frühzeitig zum Ansprechen der Schmelzlotauslösung führen. Bei Zuluftkanälen erfolgt die Schmelzlotauslösung dagegen erheblich später. Hier kann durch Abschalten der Zwangslüftung das Ansprechen entscheidend verbessert werden. Durch Vorhalten einer weiteren Auslöseeinrichtung kann das Versagen entsprechend reduziert werden. Die manuelle Auslösung ist von der Anwesenheit von Personal abhängig. Die Brandschutzklappen können ebenso wie die Feuerschutzabschlüsse infolge mechanischer Beschädigung, Klemmen oder fehlerhaftem Einbau in ihrer Dichtigkeit beeinflußt werden.

In /6/ sind Prüfungsergebnisse von Brandschutzklappen aus zwei Kernkraftwerken angegeben. Nach 10921 Überprüfungen wurde eine mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit von $4,18 \cdot 10^{-2}$ ermittelt. Darunter wurden 4,84 % der Brandschutzklappen mit pneumatischer Auslösung, 3,3 % mit Magnetauslösung und nur 1,67 % mit Handauslösung als ausgefallen eingestuft. Einerseits kann

man davon ausgehen, daß die Einrichtungen in Kernkraftwerken besser gewartet werden als industrielle Anlagen, andererseits handelt es sich bei den Ausfallwahrscheinlichkeiten um obere Grenzwerte, weil nicht jeder als Ausfall eingestufte Mangel im Anforderungsfall zum Ausfall der Klappen führen muß. Zudem handelt es sich in der Untersuchung um neuere Anlagen, in denen nach den ersten Betriebsjahren die Ausfallwahrscheinlichkeiten aller aktiven Brandschutzmaßnahmen drastisch gesenkt werden konnte. Für die Systemanalyse mögen die Zahlen jedoch hinreichend genau sein.

Rohre und Formstücke von Lüftungsleitungen werden in den Feuerwiderstandsklassen L 30 - L 120 klassifiziert. Sie sind ebenso wie die Brandschutzklappen für den Raumabschluß von Bedeutung, weil nicht in jede durch ein raumabschließendes Bauteil führende Leitung eine Brandschutzklappe eingebaut werden muß.

3.4 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

3.4.1 Überblick

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) beeinflussen einen Brand vom Entstehungsbrand bis zum vollentwickelten Brand und helfen, die Auswirkungen des Brandes auf seine Umgebung zu reduzieren.

Beide Anlagearten arbeiten durch den thermischen Auftrieb und erfüllen wechselseitige Aufgaben. Rauchabzugsanlagen (RA) sorgen für eine rauchfreie Schicht am Boden, die eine Menschenrettung und einen Löschangriff ermöglichen soll. Sie haben in der Regel einen kleineren Querschnitt als Wärmeabzugsanlagen. Die Dimensionierung nach DIN 18232, Teil 2 /21/ erfolgt für die Zeit vor dem Flashover und erklärt sich aus der Wirkungsweise der Rauchabzugsanlagen. Wärmeabzugsanlagen (WA) führen

die heißen Brandgase ab, verzögern oder verhindern den Feuerübersprung und mindern die thermische Beanspruchung der Bauteile. Ein Normteil für die Bemessung von Wärmeabzugsanlagen ist in Vorbereitung.

Tabelle 3.8 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "Lüftungsabschluß des Raumes"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
technisches Versagen der Brandschutzklappen einschließlich technischem Versagen der Schließvorrichtung		$4,18 \cdot 10^{-2} \text{ }^1$
keine Auslösung über die Brandmeldezentrale		$5 \cdot 10^{-2} \text{ }^2$
kein manuelles Schließen der Brandschutzklappen	dauernd anwesende Personen	$1 \cdot 10^{-1} \text{ }^3$
	die überwiegende Zeit anwesende Personen	$8 \cdot 10^{-1} \text{ }^3$
	etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$9,9 \cdot 10^{-1} \text{ }^3$
	nur selten anwesende Personen	1 ^3
zeitvariante Versagensereignisse		
Anregungsschwelle der Schmelzlotauslösung nicht erreicht (Zuluftkanal)		- ^4
Versagen der Brandschutzklappen infolge Brandeinwirkung		- ^4
Versagen der Lüftungsleitungen infolge Brandeinwirkung		- ^4
 ^1) aus /6/ ^2) eigene Schätzung ^3) amerikanischen Daten nach /18/ ^4) vgl. Abschnitt 4.2.2		

Rauchabzugsanlagen sind nach DIN 18232, Teil 2 mit einer manuellen Fernauslösung und einem automatisch wirkenden thermischen Auslöser zu versehen. Rauchgasventilatoren werden eingesetzt, um die heißen Gase und Rauchpartikel abzusaugen und ins Freie zu leiten.

Unabhängig von der Auslösungsart können Komponenten der RWA durch den Brand in Mitleidenschaft gezogen werden. So kann die Zwangsentlüftung ausfallen, wenn ihre Stromversorgung unterbrochen wird. Andererseits werden Lichtkuppeln aus Kunststoff oder Teile der Dachdeckung derart konzipiert, daß sie im Brandfall infolge der Temperaturentwicklung gezielt versagen und somit nach dem Fail Safe-Prinzip die Funktionsfähigkeit der Rauch- und Wärmeabzugsanlage sicherstellen. Die Öffnungsfläche dieser Anlagen darf allerdings nicht überschätzt werden.

Die RWA werden in ihrer Wirkungsweise stark beeinträchtigt, wenn durch unsachgemäße Reparaturarbeiten Abzugsöffnungen permanent verschlossen werden. Ein Teilausfall der RWA kann auch dann eintreten, wenn übermäßige Eis- oder Schneelasten, vor allem bei horizontalen Abzügen, ein Öffnen verhindern. Die unvollständige Öffnung der Abzüge kann in Teilbereichen des Brandraumes erhebliche Rauch- und vor allem Temperaturbeanspruchungen der Bauteile verursachen, wenn sich durch vorhandene Rauchschrägen ein Wärmestau unter der Decke (in einem Feld) bildet.

Die Wirkung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen wird weiterhin von den Ventilationsverhältnissen im Brandraum bestimmt, die sie letztlich selbst maßgebend beeinflussen. Das alleinige Öffnen der Abzüge verursacht zunächst nur einen Teilabzug der heißen Rauchgase, der von den Druckverhältnissen im Brandraum abhängig ist. Erst eine zusätzliche Belüftung im unteren Teil der Halle durch Feuerschutzabschlüsse, Verglasungen oder spezielle Zuluftkanäle (ggf. mit Ventilatoren) ermöglicht die

wirkungsvolle Fortleitung der schädigenden Faktoren. Die selbstschließenden Feuerschutzabschlüsse werden voraussichtlich erst geöffnet, wenn die Feuerwehr vor Ort ist und einen gezielten Löschangriff im Innern des Gebäudes vornimmt. Daher muß eine ausreichende Belüftung durch Zuluftkanäle vor dem Eintreffen der Feuerwehr sichergestellt werden.

Die Inbetriebnahme dieser Belüftungseinrichtungen hängt von ihrer Auslöseart ab und kann mit der Auslösung der Abzugöffnungen gekoppelt werden. Feuerschutzabschlüsse und Verglasungen sind davon jedoch ausgenommen.

Die Wirkung der Zuluftkanäle wird durch folgende Faktoren beeinflusst (gleiches gilt auch für Feuerschutzabschlüsse und Verglasungen) :

- kein oder unzureichendes Öffnen der Zuluftkanäle,
- ungenügende Dimensionierung der Zuluftkanäle,
- unzulässige Veränderungen an den Zuluftkanälen wie dauerhaftes Verschließen oder Verstopfen der Kanäle.

3.4.2 Manuelle Auslösung der RWA

Die manuelle Auslösung der Rauch- und Wärmeabzugseinrichtung kann zentral von einer Warte (z.B. Brandmeldezentrale), von einer zentralen Stelle im Brandraum oder als eine Kombination von beiden erfolgen. Sofern eine Warte existiert, wird davon ausgegangen, daß sie ständig von Wachpersonal besetzt ist.

Vorteil der manuellen Auslösung ist, daß alle Abzüge gleichzeitig geöffnet werden können. Die Verzögerungszeit der manuellen Auslösung vom Brandraum ist geringer als von einer zentralen Stelle, weil der Zeitverzug durch die vorab erfor-

derliche Brandmeldung entfällt. Ein großer Nachteil dieser Auslösungsart ist ihre Abhängigkeit von anwesendem Betriebspersonal. Die daraus resultierenden Versagensereignisse wurden bereits in der Komponente "direkte personelle Brandmeldung" erläutert.

Tabelle 3.9 Zeitinvariante Versagensereignisse der Komponente "manuelle Auslösung der RWA"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Ausfall der Auslösung vom Brandraum	dauernd anwesende Personen	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^1)$
	die überwiegende Zeit anwesende Personen	$8 \cdot 10^{-1} \text{ } ^1)$
	etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$9,9 \cdot 10^{-1} \text{ } ^1)$
	nur selten anwesende Personen	1 $^1)$
Ausfall der Auslösung von einer ständig besetzten Warte		$1 \cdot 10^{-2} \text{ } ^2)$
technisches Versagen der manuellen Auslösung		$5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^2)$
kein oder unzureichendes manuelles Öffnen der Zuluftkanäle		$1 \cdot 10^{-2} \text{ } ^2)$
$^1)$ aus amerikanischen Daten nach /18/ $^2)$ eigene Schätzung		

3.4.3 Automatische Auslösung der RWA

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen arbeiten nach dem Fail Safe-Prinzip und sind somit unabhängig von einem Brandmeldesystem. Bei einer Temperatur von ca. 92°C (nach DIN 18232, Teil 2 : 72°C) öffnen die Abzüge automatisch, weil sich bei dieser Temperatur das Schmelzlot auflöst. Das Öffnen der Abzüge erfolgt

bei der automatischen Auslösung allerdings nicht synchron; im Brandraum muß von einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung ausgegangen werden, wodurch die Auslösetemperatur der Schmelz-lote zu unterschiedlichen Zeiten erreicht wird. Das gleiche gilt auch für Lichtkuppeln oder dergleichen, die sich bei überhöhter Temperatureinwirkung auflösen.

Tabelle 3.10 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "automatische Auslösung der RWA"

Ereignis	Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse	
technisches Versagen der automatischen Auslösung	$5 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾
kein oder unzureichendes automatisches Öffnen der Zuluftkanäle	$5 \cdot 10^{-3}$ ¹⁾
zeitvariante Versagensereignisse	
Versagen der Schmelzlotauslösung infolge zu geringer Temperaturentwicklung	- ²⁾
kein Selbstaflösen von Bauteilen zur Rauch- und Wärmeabfuhr	- ²⁾
¹⁾ eigene Schätzung ²⁾ vgl. Abschnitt 4.3	

Die Verzugszeiten der automatischen Auslösung sind von der Temperaturentwicklung im Brandraum abhängig. Der Schwelbrand eines starken Qualmers kann unter niedriger Temperaturentwicklung zur vollständigen Verqualmung des Brandraumes führen und somit die Rettung von Menschen und den gezielten Löschangriff stark behindern. Sind die Rauchabzugsöffnungen genügend groß dimensioniert, kann zumindest noch ein verspäteter gezielter Löschangriff vorgenommen werden, wenn am Boden eine rauchfreie Schicht entsteht. Die Abführung der heißen Brandgase durch andere Entlüftungsöffnungen wie noch nicht verschlossene Feuerschutzabschlüsse kann unter Umständen die Bildung der Rauch-

gasschicht reduzieren. Gleichzeitig wird allerdings auch die Aufheizphase der Schmelzlotauslöser verlängert. Die Größe des Raumes kann virtuell durch Rauchschürzen reduziert werden. Die heißen Brandgase sammeln sich somit zunächst in einem Feld und können das Ansprechverhalten der Schmelzlotauslöser günstig beeinflussen, weil das Temperaturgefälle vom Brandherd zu den Schmelzlotauslösern lokal reduziert wird.

3.5 Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal

Der größte Löscherfolg wird durch die frühestmögliche Brandbekämpfung in der Entstehungsphase eines Brandes erreicht. Selbsthilfeeinrichtungen ermöglichen dem Betriebspersonal, eine erste Brandbekämpfung vorzunehmen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Erstbrandbekämpfung wird daher einmal mehr im wesentlichen von der Anwesenheit des Betriebspersonals in Brandraum bestimmt. Die möglichen Versagensursachen und deren Abhängigkeiten wurden bereits erläutert. Zu den Selbsthilfeeinrichtungen zählen :

- Wandhydranten,
- Handfeuerlöschgeräte,
- Feuerlöschbrausen,
- Löschdecken.

Die Selbsthilfekräfte sollen sich durch ihren Einsatz nicht unnötig in Gefahr begeben. Dementsprechend müssen die Löschgeräte und -anlagen in der Nähe der Ausgänge angebracht sein. Für eine erfolgreiche Brandbekämpfung ist das Vordringen zum Brandherd erforderlich. Ein Versagen tritt ein, wenn ein Brand an einer für das Personal und das Löschmittel unerreichbaren Stelle entsteht oder infolge von Rauch- und Wärmeeinwirkung unzugänglich ist.

Eine allgemeine Unterweisung in die für die Selbsthilfekräfte verfügbaren Löschgeräte und -anlagen wird vorausgesetzt. Feuerlöschbrausen und Löschdecken werden vorwiegend zum Ablöschen brennender Personen eingesetzt und eignen sich nur bedingt zu einer Brandbekämpfung. Handfeuerlöscher sind durch ihren begrenzten Inhalt nur für Entstehungsbrände und nur kurze Zeit einsetzbar. Daher ist die Kenntnis des richtigen Umgangs mit Handfeuerlöschern für den Löscherfolg sehr wichtig.

Aus Unkenntnis der zuständigen Stellen von Industriebetrieben werden oftmals teure ("Allzweck-") Pulverlöcher angeschafft, die das Ablöschen brennender Stoffe der Brandklassen A (fest), B (flüssig oder flüssig werdend) und C (gasförmig) ermöglichen. Größtenteils gehören die brennbaren Stoffe jedoch der Brandklasse A an, deren Brand durch billigere, aber mindestens ebenso wirkungsvolle Wasserlöscher bekämpft werden kann. Besondere Gefahren erfordern jedoch spezielle Löschmittel. Bei Flüssigkeitsbränden (Brandklasse B) ist das Löschen mit Wasser nur bedingt durch größeren Löschmitteleinsatz und nur mit ausgebildetem Personal möglich, wenn es gelingt, den Brand in eine Ecke zu treiben. Wahlloses Hineinspritzen fördert nur die Verteilung der brennenden Flüssigkeit auf angrenzende Bereiche. Metallbrände (Brandklasse D) können nur mit speziellen (Kochsalz-) Pulverlöschern oder trockenem Sand bekämpft werden. Löschmittel der Brandklassen A, B und C sind bei Metallbränden ungeeignet.

Für die Brandklasse A wird der wirkungsvollste Löschangriff durch den Einsatz des C-Strahlrohres eines Wandhydranten erreicht. Diese Wandhydranten müssen allerdings von zwei Personen bedient werden, weil der aufgerollte C-Schlauch zunächst vollständig von einer Haspel abgerollt werden muß, bevor "Wasser marsch" gegeben werden kann. Für den Ein-Mann-Betrieb eignet sich besser ein Wandhydrant mit formstabilem auf einer Haspel aufgerolltem D-Druckschlauch und D-Strahlrohr. Zusätz-

lich zum Löschmittel "Wasser" kann im Wandhydrant für besondere Brandklassen Schaummittel inklusive Schaumrohr und Zumischer bereitgestellt werden. Diese Ausrüstung kann nur von zwei Personen bedient werden, weil eine ständige Überwachung des Schaummittelbehälters samt Zumischer erforderlich ist.

Fehlende oder beschädigte Ausrüstungsgegenstände der Wandhydranten sowie die Nichteinhaltung ihrer Wartungsintervalle können zum Versagen einer wirksamen Erstbrandbekämpfung führen.

Der Einfluß des Löschmittels auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente wird wie folgt berücksichtigt:

- Handfeuerlöscher können versagen, wenn das Treibmittel infolge Undichtigkeiten fehlt oder das Löschmittel zu alt geworden ist (Nichteinhaltung der Wartungsintervalle, Verfestigung des Pulvers, Einfrieren von Wasserlöschern, etc.).
- Das Löschmittel kann infolge unbefugtem Zuschiebern von Versorgungsleitungen ausfallen.
- Das Löschmittel der Selbsthilfeeinrichtungen ist zum Löschen des Brandes ungeeignet.
- Das Löschmittel wird nicht im erforderlichen Umfang bereitgestellt. Die Tragbarkeitsforderung von Handfeuerlöschern beschränkt seinen Inhalt (max. 20 kg) und somit die Löschzeit (max. ca. 15 Sekunden). Schaummittel wird im allgemeinen nur in 20 l Kanistern in Wandhydranten bereitgestellt. Die Löschwasserversorgung kann infolge des Brandes ausfallen.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit für "kein oder ungenügend Löschmittel" wird für die Wandhydranten aus /18/ übernommen. Diese

Zahl stammt aus dem amerikanischen, konventionellen Industriebereich.

Die Wahrscheinlichkeit, daß mit den Wandhydranten kein Löscherfolg erzielt wird, wird in /18/ mit $6 \cdot 10^{-2}$ angegeben. Für Handfeuerlöscher wird in Abhängigkeit der Zeit nach automatischer Brandentdeckung in /18/ die Ausfallwahrscheinlichkeit gemäß Tabelle 3.11 angegeben. Diese Zahlen können in der späteren Systemanalyse zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

Die erfolgreiche Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal wird weiter von der Wirksamkeit des Löschmittels, der vom Brand erfaßten Fläche sowie der Rauch- und Wärmeentwicklung im Brandraum beeinflußt. Das Versagen infolge zu großer Brandausbreitung wird in Abschnitt 4 untersucht. Ausfallwahrscheinlichkeiten des Löschmittels werden in Tabelle 3.12 angegeben.

Tabelle 3.11 Versagenswahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch Handfeuerlöscher in der Brandentstehungsphase nach /18/

Zeit nach Brandentdeckung	personelle Brandentdeckung und unmittelbare Brandbekämpfung	automatische Brandentdeckung			
		1 min	3 min	10 min	> 10 min
Versagenswahrscheinlichkeit	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	$9,5 \cdot 10^{-1}$

Sowohl die Rauch- als auch die Temperaturentwicklung werden im Modell nicht berücksichtigt. Die Temperaturentwicklung kann vernachlässigt werden, weil davon ausgegangen wird, daß vor der Aufheizung auf eine geschätzte Ausfalltemperatur von maximal 120°C die Rauchentwicklung soweit fortgeschritten ist, daß

ohne umluftunabhängige Atemschutzgeräte kein Angriff mehr vorgenommen werden kann.

Die Ermittlung von zeitvarianten Versagenswahrscheinlichkeiten infolge Rauchentwicklung mit dem Programmsystem FORM /16/ ergab bei Vorgabe einer einfachen Grenzfunktion (vgl. Abschnitt 4.1) keine für die Systemanalyse signifikanten zeitvarianten Ergebnisse. Das Versagen trat mehr oder weniger schlagartig ein. Die Grenzfunktion wurde mit zwei Basisvariablen beschrieben. Als Widerstand wurde eine konstante Größe gewählt, die als ertragbare Rauchkonzentration interpretiert werden könnte. Die Einwirkung ergab sich aus der Integration der Einheits-Temperaturzeitkurve über die Zeit und der Abminderung des berechneten Integrals mit einem Faktor, der unterschiedliche Rauchentwicklungen von Brandlasten simulieren sollte. Als Fazit dieser Rechnungen kann unter Vorgabe einer Brandlast, die unter gegebenen Abbrandbedingungen eine bestimmte Menge an Rauchgasen entwickelt, ein Zeitpunkt festgelegt werden, zu dem die Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal infolge Verqualmung des Brandraumes versagt. Dieser Zeitpunkt kann in der Systemanalyse berücksichtigt werden.

3.6 Brandbekämpfung durch Löschhilfeanlagen

3.6.1 Überblick

Löschhilfeanlagen sind ortsfeste Brandbekämpfungseinrichtungen, die einen Brand auf seinen Entstehungsbereich begrenzen sollen, wenn ein rechtzeitiges Eingreifen der Feuerwehr fraglich ist. Eine automatische Alarmierung der Feuerwehr, die dann Nachlöscharbeiten vornimmt, ist auf jeden Fall erforderlich, da durch Löschhilfeanlagen kein vollständiger Löscherfolg sichergestellt werden kann.

Tabelle 3.12 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse des Teilsystems "Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Ausfall der Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal	dauernd anwesende Personen	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
	die überwiegende Zeit anwesende Personen	$8 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
	etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$9,9 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
	nur selten anwesende Personen	1 $^{1)}$
kein oder ungenügend Löschmittel vorhanden		$1,18 \cdot 10^{-2} \text{ } ^{1)}$
Löschmittel oder -geräte defekt	Handfeuerlöscher	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{2)}$
	Wandhydranten	$1 \cdot 10^{-2} \text{ } ^{2)}$
Löschmittel ungeeignet für überwiegend vorhandene Stoffe der	Brandklasse A	$5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{2)}$
	Brandklasse B	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{2)}$
	Brandklasse C	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{2)}$
	Brandklasse D	$7,5 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{2)}$
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandbekämpfung infolge zu großer Brandausbreitung		- $^{3)}$
$^{1)}$ aus amerikanischen Daten nach /18/ $^{2)}$ eigene Schätzung $^{3)}$ vgl. Abschnitt 4.4		

Zu den Löschhilfeanlagen zählen:

- Sprinkleranlagen,
- Sprühwasserlöschanlagen,
- Schaumlöschanlagen,

- CO₂-Löschanlagen,
- Pulverlöschanlagen,
- (Halonlöschanlagen).

Die Auslösung von Löschhilfeanlagen erfolgt manuell oder automatisch. Die manuelle Auslösung kann vom Brandraum oder von einer ständig besetzten Warte durchgeführt werden. Die automatische Auslösung erfolgt über das Brandmeldesystem oder über thermische Auslöser (Schmelzlotauslöser oder Flüssigkeitsgläschen). Sprinkleranlagen werden bis zu Hallenhöhen von ca. 7 m eingesetzt; in zu hohen Hallen öffnen die Sprinklerköpfe infolge großflächiger Wärmeausbreitung zu spät.

Signaleinrichtungen von Löschhilfeanlagen können eine Brandmeldung auslösen oder im Raum anwesendes Betriebspersonal zum Verlassen des Raumes auffordern. Diese Einrichtungen sind besonders bei CO₂- und Schaumlöschanlagen zum Schutz des Betriebspersonals notwendig (Erstickungsgefahr, Orientierungslosigkeit). Die Brandmeldung durch Löschhilfeanlagen wird in der Komponente "indirekte automatische Brandmeldung" erfaßt.

Bei Auslösung von CO₂-Anlagen ist das Schließen der Türen und Tore erforderlich, um den gewünschten Löscherfolg zu erzielen. Sofern das Schließen der Feuerschutzabschlüsse nicht bereits durch ihre eigenen Detektoren ausgelöst wurde, sollte ihre Schließvorrichtung von der Löschhilfeanlage automatisch angesteuert werden. Das korrekte Schließen der Abschlüsse sollte nach Möglichkeit durch einen Brandläufer kontrolliert werden, setzt jedoch die Kenntnis der Auslösung voraus. Das Löschmittel von CO₂-Anlagen tritt erst nach einer Verzögerungszeit von ca. 45 Sekunden aus, um dem Personal genügend Zeit zum Verlassen des Raumes zu geben.

Die Wirksamkeit von Löschhilfeanlagen richtet sich nach ihrer Art, dem Löschmittel, dem Funktionszustand diverser Anlagenteile, der Hallenhöhe und der Art, Menge und Verteilung der Brandlast. Sprühwasserlöschanlagen verbreiten gegenüber Sprinkleranlagen eine wesentlich größere Wassermenge pro Zeiteinheit, weil sämtliche Sprühköpfe der Anlage ständig geöffnet sind. Sie sind daher auch empfindlicher gegenüber Störungen in der Löschwasserversorgung.

In /18/ sind umfassende Ergebnisse einer VdS-Untersuchung für drei verschiedene deutsche Anlagentypen aus den Jahren 1974 - 1979 wiedergegeben. Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen wurden darin zusammengefaßt, weil die Systemkomponenten, der Aufbau und die Funktionsweise nahezu identisch sind. Für Schaum- und Pulverlöschanlagen sind dort keine Werte angegeben. Diese Anlagen werden ebenso wie Sprühwasserlöschanlagen nur selten eingebaut. Tabelle 3.13 enthält die Ausfallwahrscheinlichkeiten der genannten Anlagen. Darin sind zum einen die Versagenswahrscheinlichkeit für die technische Verfügbarkeit der Systeme einschließlich der Löschmittelversorgung wiedergegeben und zum anderen die Versagenswahrscheinlichkeit der Anlage im Anforderungsfall unter Berücksichtigung der Wirksamkeit des Löschmittels. Entgegen den Erwartungen ist die Versagenswahrscheinlichkeit von Löschhilfeanlagen nach der VdS-Prüfung gegenüber realen Anforderungsfällen bei "beiden" Anlagentypen um den Faktor 5 größer. Die durch Prüfungen ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten stellen auch hier wieder obere Grenzwerte dar; nicht jeder festgestellte Fehler führt im Anforderungsfall auch wirklich zum Ausfall der gesamten Löschhilfeanlage (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Die in der Untersuchung von 11369 Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen (1978 und 1979) einzeln aufgeführten Mängel lassen erkennen, daß die Funktionsfähigkeit vor allem durch technische Mängel an den Anlagen beeinflusst wird. In 6,3 % aller Fälle können technische Mängel bei den überprüften Anlagen zum

Für die 5339 überprüften CO₂-Anlagen sieht das Bild ähnlich aus. Technische Mängel, die zum Ausfall der Anlage führen können, wurden in 7,6 % der Fälle festgestellt, davon 3,1 % an Anrege- und Auslöseorganen. Die Funktion der Anlage wird bedingt durch Mängel an Selbstschließeinrichtungen (3,1 %) und Mängel an Alarmeinrichtungen (4,5 %) beeinträchtigt. In 2,2 % der Fälle war die Abschaltung von Betriebsmitteln auf menschliches Versagen zurückzuführen. In 3,0 % der Fälle wurde die Ersatzmenge zu gering bemessen. Mangelnde bauliche Abtrennung der Schutzbereiche und CO₂-Flaschen (4,0 %) sowie unzulässig hoher CO₂-Schwund aus den Flaschen (1,0 %) können ebenfalls die Funktionsfähigkeit der Anlage beeinträchtigen.

In /18/ sind weitere Werte für die Wahrscheinlichkeit, daß mit der Löschhilfeanlage kein Löscherfolg erzielt wird, angegeben. Ausgehend von den ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten der genannten VdS-Untersuchung wird darin auch die Wirksamkeit des Löschmittels gemäß einer anderen Untersuchung nach /18/ berücksichtigt. Für Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen ergibt sich eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $1,1 \cdot 10^{-1}$ und für CO₂-Anlagen ein Wert von $2,1 \cdot 10^{-1}$ pro Anforderung. Für amerikanische Anlagen ergeben sich nach einer weiteren Untersuchung /18/ ähnliche Werte (Sprühwasserlöschanlagen : $0,7 \cdot 10^{-1}$; CO₂-Anlagen : $2,2 \cdot 10^{-1}$). Diese Daten beschreiben scheinbar global die Wirksamkeit der Löschhilfeanlagen. Sie werden allerdings nicht für die Systemanalyse benutzt, weil nicht geklärt werden konnte, welche Werte zur Ermittlung dieser Wahrscheinlichkeiten gedient haben. Die Wirksamkeit der Löschmittel wird ebenfalls nicht genannt.

Ausgehend von den VdS-Prüfungen werden die einzelnen Mängel in Komponenten zusammengefaßt und ihre Versagenswahrscheinlichkeiten als obere Grenzwerte ermittelt. Die gewählten Ereignisse für das Versagen der Löschhilfeanlage sind der Tabelle 3.14 zu entnehmen. Der zeitabhängige Ausfall von Komponenten infolge Brandeinwirkung wird in Abschnitt 4 genauer unter-

sucht. Die Versagenswahrscheinlichkeit der Löschhilfeanlage hängt von weiteren Faktoren ab, die durch die Auslösungsart bestimmt wird. Diese Faktoren werden in den Abschnitten 3.6.1 und 3.6.2 beschrieben.

3.6.2 Manuelle Auslösung der Löschhilfeanlage

Die unterschiedlichen Auslösungsarten der Löschhilfeanlagen erfordern die gesonderte Betrachtung von Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen. Für Sprinkleranlagen, deren Düsen im Normalfall ständig geschlossen sind, kommt nur die automatische Selbstauslösung in Frage (vgl. Abschnitt 3.6 und 3.6.2).

Die vom Brandraum vorgenommene manuelle Inbetriebnahme der Löschhilfeanlage kann früher erfolgen als die automatische Selbstauslösung oder die von einer ständig besetzten Warte vorgenommene Auslösung. Der zeitliche Vorsprung wird die Brandwirkung und -ausbreitung entsprechend reduzieren helfen. Maßgebend für die manuelle Auslösung vom Brandraum ist die Anwesenheit von Betriebspersonal. Für die Auslösung von einer Warte ist vorab eine manuelle oder automatische Brandmeldung nötig.

Die Versagenswahrscheinlichkeit der manuellen Auslöseorgane von CO₂-Anlagen kann mit Hilfe des in Abschnitt 3.6 angegebenen Wertes abgeschätzt werden. Eine Modifizierung dieses Wertes ist erforderlich, weil darin auch automatische Anrege- und Auslösekomponenten enthalten sind. Es wird näherungsweise für die Hälfte aller Fälle ein technisches Versagen von Auslöseinrichtungen angenommen, die zur manuellen Inbetriebnahme der Anlage nötig sind.

Tabelle 3.14 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "Brandbekämpfung durch Löschhilfeanlagen"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
technisches Versagen von Komponenten der Löschhilfeanlage	Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen	$6,31 \cdot 10^{-2} \text{ }^1)$
	CO ₂ -Löschanlagen	$4,53 \cdot 10^{-2} \text{ }^2)$
keine oder ungenügende Löschmittelversorgung	Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen	$4,95 \cdot 10^{-2} \text{ }^3)$
	CO ₂ -Löschanlagen	$4,01 \cdot 10^{-2} \text{ }^4)$
Versagen von Komponenten durch menschliches Fehlverhalten	Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen	$2,12 \cdot 10^{-2} \text{ }^5)$
	CO ₂ -Löschanlagen	$2,23 \cdot 10^{-2} \text{ }^6)$
Versagen durch ungeeignetes Löschmittel	Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen	$1 \cdot 10^{-2} \text{ }^7)$
	CO ₂ -Löschanlagen	$1 \cdot 10^{-3} \text{ }^7)$
Versagen durch Unterwanderung der Löschhilfeanlage	Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen	$1 \cdot 10^{-2} \text{ }^7)$
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandbekämpfung infolge zu großer Brandausbreitung		- ⁸⁾
Versagen von Komponenten der Löschhilfeanlage durch Brandeinwirkung		- ⁹⁾
¹⁾ nach VdS /18/ : 717 Fälle ²⁾ nach VdS /18/ : 242 Fälle (166 Mängel an Anrege- und Auslöseorganen werden gesondert betrachtet) ³⁾ eigene Schätzung : 426 Fälle unzureichende Leistungsfähigkeit (100%) + 1373 Fälle Nutzungsänderung (10%) ⁴⁾ nach VdS /18/ : 159 Fälle Ersatzmenge zu gering + 55 Fälle CO ₂ -Schwund ⁵⁾ nach VdS /18/ : 241 Fälle ⁶⁾ nach VdS /18/ : 119 Fälle ⁷⁾ eigene Schätzung ⁸⁾ vgl. Abschnitt 4.4 ⁹⁾ vgl. Abschnitt 4.3		

3.6.3 Automatische Auslösung der Löschhilfeanlage

Die automatische Auslösung der Löschhilfeanlage setzt eine erfolgreiche Meldung an eine auslösende Einheit voraus. Als auslösende Einheit werden hier sowohl die Brandmeldezentrale als auch die thermischen Selbstausröser betrachtet.

Tabelle 3.15 Zeitinvariante Versagensereignisse der Komponente "manuelle Auslösung der Löschhilfeanlage"

Ereignis			Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse			
Versagen der manuellen Auslösung der Löschhilfeanlage durch anwesendes Betriebspersonal	Sprühwasserlösch- und CO ₂ -Löschanlagen	dauernd anwesende Personen	$1 \cdot 10^{-1} \text{ }^1$
		die überwiegende Zeit anwesende Personen	$8 \cdot 10^{-1} \text{ }^1$
		etwa 1/3 der Zeit anwesende Personen	$9,9 \cdot 10^{-1} \text{ }^1$
		nur selten anwesende Personen	1 ¹⁾
Versagen der manuellen Auslösung der Löschhilfeanlage von einer Warte (u.a. fehlende Brandmeldung)	Sprühwasserlösch- und CO ₂ -Löschanlagen		$5 \cdot 10^{-2} \text{ }^2$
technisches Versagen von manuellen Auslöseorganen	Sprühwasserlöschanlagen		$2 \cdot 10^{-2} \text{ }^2$
	O ₂ -Löschanlagen		$1,55 \cdot 10^{-2} \text{ }^3$
¹⁾ aus amerikanischen Daten nach /18/ ²⁾ eigene Schätzung ³⁾ eigene Schätzung (verminderter Wert nach Abschnitt 3.6)			

Die Selbstausröser von Spinkleranlagen richtet sich nach der Temperaturentwicklung an den Auslöseeinheiten. Die Flüssigkeitsgläschen können entsprechend der zu erwartenden Temperaturentwicklung im Brandraum bzw. in der Umgebung der Sprinklerköpfe abgestimmt werden. Üblich sind Gläschen oder Schmelzlotauslöser, die bei einer Eigentemperatur von ca. 68 -72°C platzen. Ein Versagen kann eintreten, wenn durch die Lüftungsverhältnisse die heißen Brandgase an den Auslösern

vorbeigeführt werden. Rauch- und Wärmeabzugseinrichtungen können das Ansprechverhalten der Löschhilfesanlagen nachteilig beeinflussen, weil durch sie ein entscheidender Eingriff in die Lüftungsverhältnisse des Brandraumes vorgenommen wird. Die Frage nach Auslösungsart und -zeitpunkt von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen wird daher zur Zeit heftig diskutiert.

CO₂-Löschanlagen und Sprühwasserlöschanlagen können über die Brandmeldezentrale angesteuert werden. Dies setzt eine erfolgreiche Meldung an die Brandmeldezentrale durch Brandmelder voraus. Das Versagen der Informationsübertragung vom Brandmelder zur Zentrale und zurück zum Auslösemechanismus kann zum Ausfall der automatischen Auslösung führen.

Bei CO₂-Löschanlagen ist wie bereits erwähnt eine frühzeitige Alarmierung des anwesenden Betriebspersonals im Brandraum sowie das selbsttätige Schließen der Feuerschutzabschlüsse nötig. Die verdrängende und erstickende Wirkung des Löschmittels setzt eine ausreichende CO₂-Konzentration im Brandraum voraus. Für die Versagenswahrscheinlichkeit der Anrege- und Auslöseorgane von CO₂-Anlagen wird der in Abschnitt 3.6 genannte Wert voll angesetzt. Gemäß der Einteilung in Tabelle 3.16 wird dieser Wert auf die "Brandmeldezentrale" und die "Auslöseeinrichtung" aufgeteilt.

3.7 Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr

Dem Begriff der "betrieblichen Feuerwehr" werden im folgenden sowohl die öffentlich anerkannte Werkfeuerwehr als auch die Betriebsfeuerwehr zugeordnet. Wie später noch gezeigt wird, muß bei der Systemanalyse zwischen diesen Feuerwehrarten unterschieden werden.

Tabelle 3.16 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse der Komponente "automatische Auslösung der Löschhilfeanlage"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
Versagen der automatischen Auslösung über die Brandmeldezentrale	Sprühwasserlöschanlagen	$1 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾
	CO ₂ -Löschanlagen	$1,55 \cdot 10^{-2}$ ²⁾
technisches Versagen von automatischen Auslöseorganen	Sprühwasserlöschanlagen	$1 \cdot 10^{-2}$ ¹⁾
	CO ₂ -Löschanlagen	$1,55 \cdot 10^{-2}$ ²⁾
Versagen der Selbstschließeinrichtungen	CO ₂ -Löschanlagen	$3,05 \cdot 10^{-2}$ ³⁾
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der thermischen Selbstauslöser	Sprinkleranlagen	- ⁴⁾
¹⁾ eigene Schätzung ³⁾ nach VdS /18/ : 163 Fälle		²⁾ eigene Schätzung (verminderter Wert nach Abschnitt 3.6) ⁴⁾ vgl. Abschn. 4.3

Die Werkfeuerwehr ist eine in den meisten Landesfeuerwehrgesetzen der Bundesländer anerkannte haupt- oder nebenberufliche Feuerwehr eines Werkes, die hinsichtlich ihrer Ausbildung, Stärke und Ausrüstung von Behörden überwacht wird. Die Ausbildung erfolgt nach der Feuerwehr-Dienstvorschrift (FwDV, z. B. /22, 23/) der öffentlichen Feuerwehren. Im Einzelfall können Einsatzstärke und Ausrüstung das Niveau der ortsansässigen öffentlichen Feuerwehr übertreffen. Ebenso kann die Feuerwehr eines Werkes eine größere Leistungsfähigkeit haben, als die Mindeststärke einer anerkannten Werkfeuerwehr betragen muß. Ohne die aufsichtsbehördliche Anerkennung ist für Außenstehende jedoch nicht ohne weiteres erkennbar, welche personelle und sachliche Ausstattung die Werkfeuerwehr hat und ob sie den Sicherheitsanforderungen des Betriebes tatsächlich gerecht wird.

Das Niedersächsische Brandschutzgesetz enthält keine Bestimmungen über die Voraussetzungen für den Eintritt in den Werkfeuerwehrdienst, der Übertragung bestimmter Funktionen, der Aus- und Fortbildung, der Mindeststärke, Gliederung, Mindestausrüstung u.a. Eine Regelung erfolgt durch Verordnungen, Runderlässe und durch die Anwendung allgemeiner Grundsätze. Demnach richtet sich die Stärke der Werkfeuerwehr nach den Gegebenheiten des Einzelfalles und nach haupt- oder nebenberuflichen Feuerwehrangehörigen. Für nebenberufliche Werkfeuerwehren wird eine Mindest-Sollstärke von 18 Mann und eine Mindestausrückstärke je Arbeitsschicht von 9 Mann (Löschgruppe) angegeben. Für hauptberufliche Werkfeuerwehren betragen die Werte ohne Berücksichtigung zusätzlich vorhandener nebenberuflicher Mitglieder oder Löschhilfeanlagen 9 Mann und 20 % Reserve. Im Brandfall können hauptberufliche Werkfeuerwehren durch nebenberufliche Mitglieder (Mindest-Sollstärke) ergänzt werden.

Zur Grundausstattung einer nebenberuflichen Werkfeuerwehr gehört ein Tragkraftspritzenfahrzeug (TSF), zu der einer hauptberuflichen Werkfeuerwehr ein Löschgruppenfahrzeug 16 (LF 16). Sonderfahrzeuge und -geräte sowie von der Grundausstattung abweichende Fahrzeuge können nach den Erfordernissen des Betriebes verlangt werden. Aus /24/ geht hervor, daß ca. 65 % der Werkfeuerwehren mindestens ein LF 8 oder ein TLF 16 besitzen und eine Gruppenstärke (1:8) haben, die aus haupt- und nebenberuflichen Kräften gebildet wird.

Die Alarmierung der Werkfeuerwehr muß außerhalb der Arbeitszeit möglich sein. Brandsicherheitswachen sind auch zu stellen, wenn der Betrieb an Wochenenden und Feiertagen ruht.

Der Begriff der "Betriebsfeuerwehr" beschreibt ausgebildete Selbsthilfekräfte, die eine erste Unterweisung im Feuerlöschdienst erhalten haben. Die Betriebsfeuerwehr wird von der Betriebsleitung beauftragt, den Brandschutz zu überwachen und

erste Schritte im Brandfall einzuleiten, bevor die öffentliche Feuerwehr eintrifft. Eine behördliche Überwachung erfolgt nicht. Ausbildung, Stärke und Ausrüstung sind zwischen den einzelnen Betrieben sehr unterschiedlich. Aus folgenden Gründen kann man davon ausgehen, daß die Einsatzstärke einer Werkfeuerwehr nicht erreicht wird :

- Ein Industriebetrieb wäre aus Versicherungsgründen (Prämienvergünstigung) um die Anerkennung seiner Feuerwehr als Werkfeuerwehr bemüht.
- Bauliche Erleichterungen ergeben sich bei Anwendung der DIN 18230. Danach ist eine Abminderung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer nicht brandabschnittsbegrenzender Bauteile mit dem Faktor γ_{nb} möglich, wenn die Bedingungen zur Anwendung von DIN 18230 erfüllt werden (Öffentliche Feuerwehr mit mindestens einem Löschzug oder Ergänzung fehlender Stärke durch Kräfte der anerkannten Werkfeuerwehr, ausreichende Löschwasserversorgung nach DVGW-Arbeitsblatt W 405 /25/).

Die Vorzüge einer betrieblichen Feuerwehr gegenüber der öffentlichen Feuerwehr liegen in den kürzeren Anrückezeiten (Zeit zwischen Alarmierung und Eintreffen am Objekt) und in den guten Ortskenntnissen. Besonders bei Innenangriffen, die sich durch starke Rauchentwicklung für ortsunkundige Feuerwehrmänner als besonders schwierig gestalten, können Werkfeuerwehren bekannten Hindernissen ausweichen und gezielter eine Brandbekämpfung vornehmen.

Vorbeugende Brandschutzmaßnahmen tragen zur Verminderung des Brandrisikos und der Brandwirkungen bei. Werkfeuerwehren unterstützen den vorbeugenden Brandschutz, indem von ihnen Sicherheitswachen (z.B. Schweißposten) gestellt und betriebliche Brandschutzeinrichtungen und -geräte überwacht werden.

Die Verfügbarkeit betrieblicher Feuerwehren richtet sich nach ihrer Art und nach den Produktionszeiten des Betriebes. Anerkannte hauptberufliche Werkfeuerwehren leisten ihren Dienst im Schichtbetrieb auf einer regulären Feuerwache ab, während die Einsatzkräfte anderer betrieblicher Feuerwehren erst von ihrem Arbeitsplatz zum Sammelplatz eilen müssen. Eine Unterteilung der Anwesenheitszeit betrieblicher Feuerwehren wird gemäß den Produktionszeiten vorgenommen. Räumliche Gegebenheiten, die zu Verzögerungszeiten führen, können nur individuell berücksichtigt werden.

Eine eindeutige Definition der Leistungsstärke anerkannter Werkfeuerwehren wird in den Landesfeuerwehrgesetzen /26/ weder in Abhängigkeit der Betriebsgröße noch in Abhängigkeit des Industriezweiges angegeben. DIN 18230 unterteilt den γ_{nb} -Faktor in Abhängigkeit verfügbarer Löschstaffeln, die in ihrer Stärke und Ausrüstung der Feuerwehr-Dienstvorschrift 3 ("Die Staffel im Löscheinsatz", /22/) entsprechen müssen. Um Versagenswahrscheinlichkeiten für den Einsatz betrieblicher Feuerwehren festlegen zu können, wird von Vereinfachungen ausgegangen, die unter Vorlage genauerer Werte im Einzelfall modifiziert werden müßten :

- Ist eine betriebliche Feuerwehr vorhanden, wird im Modell von folgender Einsatzstärke ausgegangen:

eine Betriebsfeuerwehr mit einer Stärke von 5 Mann
(nach /22/) und einem Tragkraftspritzenfahrzeug
(TSF)

oder

eine nebenberufliche Werkfeuerwehr mit einer
Stärke von 9 Mann (nach /23/) und einem Lösch-
gruppenfahrzeug 8 (LF 8/8).

- Die Alarmierung der betrieblichen Feuerwehr erfolgt über Signaleinrichtungen (Sirene, Alarmglocke, Funkmeldeempfänger), die mit der Brandmeldezentrale und/oder mit Druckknopfmeldern gekoppelt sind.
- Die Alarmierungszeiten sind von der Feuerwehrart abhängig, können aber nur individuell festgelegt werden (vgl. Abschnitt 4.2.4). (Die Alarmierungszeit ergibt sich aus der Zeit zwischen dem Einlaufen der Brandmeldung bis zur Abfahrt der Fahrzeuge.)
- Die volle Einsatzstärke wird zu Produktionszeiten immer erreicht (bei jeder Feuerwehrart).
- Die Anrückezeiten sind von der Feuerwehrart unabhängig.
- Für Innenangriffe werden genügend Atemschutzträger mit entsprechender Ausrüstung vorausgesetzt (maximale Einsatzzeit je Trupp ca. 30-40 min).

Aus der Stärke- und Ausrüstungsangabe (DIN-Beladung der Fahrzeuge) kann bereits auf die maximal von der betrieblichen Feuerwehr vornehmbare Anzahl von Rohren geschlossen werden. Die maximal förderbare Löschwassermenge richtet sich nach der Anzahl und Leistung eingesetzter Pumpen. Eine Betriebsfeuerwehr kann danach maximal 1 B- und 1 C-Rohr vornehmen (1 Pumpe). Eine nebenberufliche Werkfeuerwehr der hier betrachteten Größe kann 1 B- und 3 C-Rohre von 2 Pumpen aus betreiben. Das Abschrauben der Mundstücke von den Strahlrohren kann die Durchflußmenge erheblich vergrößern, wenn die Pumpen und die Löschwasserversorgung in der Lage sind, die Menge zu fördern. Für die Löschwasserentnahmestellen gelten maximale Entfernungen, die sich nach der Anzahl verfügbarer B-Schläuche auf den Fahrzeugen richten. Die 300 m -Löschbereichsgrenze wird nur von der nebenberuflichen Werkfeuerwehr knapp

erreicht. Auf einem LF 8 sind 280 m B-Schläuche, auf einem TSF nur 160 m B-Schläuche nach Normbeladung verfügbar.

Der Zeitbedarf für den Aufbau des Löschangriffs setzt sich aus der Lageerkundungszeit des Einsatzleiters, dem Aufstellen der Fahrzeuge und Gerätschaften und dem Aufbau der Löschwasserversorgung zusammen. Diese Zeit ist von folgenden Faktoren abhängig:

- örtliche Gegebenheiten des Betriebes (Zufahrtswege, Aufstellflächen, etc.),
- Lage des Brandherdes,
- Lage und Zugänglichkeit der Löschwasserentnahmemöglichkeiten,
- Art und Menge der Löschwasserversorgung.

Die Löschwasserversorgung sollte unabhängig von dem Industriegebäude sichergestellt werden. Der gemeinsame Betrieb von Wandhydranten, Löschhilfeanlagen und Löschwasserentnahmestellen außerhalb des Gebäudes aus ein und derselben Leitung sollte vermieden werden. Löschwasser kann aus folgenden Quellen bereitgestellt werden :

- unerschöpfliche: Wasserleitungsnetz (abhängig), offenes Gewässer (unabhängig)
- erschöpfliche: Hochbehälter, Brunnen, Zisternen, Druckluftwasser- (unabhängig) behälter
- "Mischkulturen": erschöpfliche Wasserquellen, die bei ausreichender Dimensionierung als unerschöpflich gelten

Die beengten innerstädtischen Verhältnisse verursachen häufig, daß Zufahrts- und Aufstellflächen versperrt sind oder von dem

Industriebetrieb unzulässig anderweitig genutzt werden. Gleiches gilt für die Löschwasserentnahmestellen, bei denen besonders die Unterflurhydranten aufgrund ihrer ebenerdigen Lage einem Verstellen "hilflos ausgeliefert" sind. Die Zeit zum Räumen der Entnahmestelle von Gegenständen wie Produktionsgütern oder Autos schwankt sehr stark und ist von der Größe dieser Gegenstände und der Sichtbarkeit der Löschwasserentnahmestelle oder deren Ausschilderung im Löschbereich abhängig. Überflurhydranten bieten einen besseren Schutz, sind aber andererseits vor Beschädigungen ungeschützter und vor allem ca. fünfmal so teuer (5000 DM).

Einrichtungen für die Feuerwehr wirken sich positiv auf den Zeitbedarf für den Aufbau des Löschangriffs aus. Fest verlegte, trockene Steigleitungen ersparen den Löscheinheiten teilweise das mühsame Verlegen von Schläuchen. Die Funktionsfähigkeit dieser Einrichtungen muß jedoch durch Überwachung sichergestellt werden.

Die Zugänglichkeit des Brandherdes wird von seiner Lage, der Temperaturentwicklung und dem Brandausbreitungsmaß abhängen. Das Übergreifen des Brandes auf das Dach wird das Eindringen in das Gebäude verhindern, weil jederzeit mit dem Einsturz der Bedachung gerechnet werden muß. Ein Brand auf der Bedachung wird die Frage nach der Begehbarkeit des Daches aufkommen lassen. Stahltrapezdächer werden im Brandfall sehr schnell versagen und die Ausweitung des Brandes in das Innere des Gebäudes verursachen.

In Abhängigkeit der Brandlast können starke Rauch- und vor allem die Temperaturentwicklung das Vordringen der Löscheinheiten ins Innere des Gebäudes begrenzen oder völlig verhindern. Durch den Einsatz umluftunabhängiger Atemschutzgeräte wird der Rauch die Löschmannschaften nicht direkt gefährden. Die Sichtbehinderung wird jedoch das schnelle und gezielte Vorgehen stark beeinträchtigen.

Die Temperatur, die zum Ausfall einer personellen Brandbekämpfungsmaßnahme führt, ist ebenso wie bei Bauteilen oder Brandschutzeinrichtungen von der Einwirkungsdauer abhängig (Saunawirkung). Die erträglichen Temperaturen sind aber wesentlich geringer und können keine großen Abweichungen nach oben hin aufweisen, weil damit unverzüglich der Rückzug des Löschtrupps in kältere Gebäudeteile oder ins Freie beginnen würde.

Ein zur Brandbekämpfung durchgeführter Innenangriff der Feuerwehr wird grundsätzlich nur unter "Schwerem Atemschutz" vorgenommen. Die Einsatzzeit eines Trupps richtet sich nach dem Atemluftverbrauch des konditionsmäßig schwächeren Feuerwehrmannes, da grundsätzlich nur zu zweit vor- bzw. zurückgegangen wird. Die durchschnittliche Einsatzzeit richtet sich nach dem Inhalt der Atemschutzflaschen (Ein-Flaschengerät: 1800 l \pm 10 %, Zwei-Flaschengerät: 1600 l \pm 10 %) und der von den Löschtrupps zu leistenden Arbeit. Zur Einsatzzeit unter "Schwerem Atemschutz" zählen auch das Vorrücken zum Brandherd und der Rückzug aus dem Gebäude.

Als Feuerwehrmann wird man unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit eine möglichst geringe Entfernung zum Brandherd wählen. Bei einer Temperaturerhöhung infolge Wärmestrahlung wird man die Distanz zum brennenden Objekt entsprechend vergrößern, bis wieder eine erträgliche Strahlungsgrenze unterschritten wird. Der Einsatz des "Mannschutzes" vom Strahlrohr hilft die Wärmestrahlung des Feuers zu reduzieren. Das Selbstkühlen der Feuerwehrmänner mit dem Löschwasser sowie das Ansprechen der vorhandenen Rauch- und Wärmeabzugsanlage können die Zeitdauer, während der die Feuerwehrmänner den erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind, positiv beeinflussen.

In /18/ werden in Abhängigkeit von der Zeit des Eintreffens der Werk- bzw. öffentlichen Feuerwehr nach Erreichen der Vollbrandphase Versagenswahrscheinlichkeiten angegeben, die ebenfalls in /18/ durch Expertenangaben korrigiert werden (Tabel-

le 3.17). Aufgrund der abweichenden Betrachtung können diese Zahlen nur als Anhaltswerte benutzt werden.

Tabelle 3.17 Versagenswahrscheinlichkeit anerkannter Werkfeuerwehren bzw. der öffentlichen Feuerwehr in Abhängigkeit von der Zeit nach Eintreten der Vollbrandphase aus /18/

	Zeit nach Eintreten der Vollbrandphase		
	3 min	10 min	> 10 min
unmodifizierte Versagenswahrscheinlichkeit	$5 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$
durch Expertenangaben modifizierte Versagenswahrscheinlichkeit	$3 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$

3.8 Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr

Aufgabe der Kommunen ist u.a. die Sicherung des abwehrenden Brandschutzes und der Hilfeleistung. Sie sind verpflichtet, Mittel und Kräfte bereitzustellen, die diese Aufgaben erfüllen. Die Kommunen bedienen sich der öffentlichen Feuerwehren, die sich in folgende Arten gliedern lassen :

- Berufsfeuerwehren,
- Freiwillige Feuerwehren mit oder ohne hauptamtliche Kräfte,
- Pflichtfeuerwehren.

Den Hauptanteil der Feuerwehrmitglieder, die unter der Dachorganisation des Deutschen Feuerwehrverbandes (DFV) zusammengefaßt werden, bilden die freiwilligen ehrenamtlichen Kräfte. Berufsfeuerwehren sind in Städten mit über 100.000 Einwohnern vorgeschrieben (Nordrhein-Westfalen 150.000 Einwohner). Die Berufsfeuerwehren werden durch Freiwillige Feuerwehren ergänzt, denen ein verminderter Ausrückebereich zugeordnet wird. Städte mit weniger als 100.000 Einwohner besitzen vorwiegend

hauptamtliche Angestellte, die durch ehrenamtliche Kräfte zur vorgeschriebenen Sollstärke ergänzt werden. Pflichtfeuerwehren müssen von der Gemeinde aufgestellt werden, wenn die erforderliche Personalstärke einer Freiwilligen Feuerwehr nicht erreicht wird oder unter die Mindeststärke absinkt (in Niedersachsen z.Zt. nicht vorhanden).

Tabelle 3.18 Zeitinvariante und zeinvariante Versagensereignisse des Teilsystems "Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr"

Ereignis		Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse		
keine oder ungenügende Einsatzstärke (keine Produktionszeit)	Betriebsfeuerwehr	$3 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
	anerkannte nebenberufliche Werkfeuerwehr	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
ungenügende Ausrüstung zur Brandbekämpfung	Betriebsfeuerwehr	$2 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
	anerkannte nebenberufliche Werkfeuerwehr	$1 \cdot 10^{-1} \text{ } ^{1)}$
ungenügende Löschwasserversorgung im Schlauchbereich ³⁾	Betriebsfeuerwehr (800 l für eine Pumpe TS 8/8)	$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{1)}$
	anerkannte nebenberufliche Werkfeuerwehr (1600 l für zwei Pumpen TS 8/8)	$5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{1)}$
zeitvariante Versagensereignisse		
Versagen der Brandbekämpfung infolge zu großer Brandausbreitung	Betriebsfeuerwehr	- ²⁾
	anerkannte nebenberufliche Werkfeuerwehr	- ²⁾
¹⁾ eigene Schätzung ²⁾ vgl. Abschnitt 4.4 ³⁾ Schlauchbereich : Strecke, die mit den verfügbaren Schläuchen auf dem Fahrzeug überbrückt werden kann		

Die Ausbildung erfolgt nach der bundesweiten Feuerwehr-Dienstvorschriften (z. B. /22, 23/), um im Einsatzfall eine reibungslose Zusammenarbeit zwischen Feuerwehren verschiedener Gemeinden und Arten zu gewährleisten. Die Mindeststärke,

Gliederung und Ausrüstung wird in Verordnungen geregelt und darf nur mit Ausnahmegenehmigung unterschritten werden. Über die Mindestanforderungen hinausgehende Maßnahmen können durch örtliche Verhältnisse erforderlich werden.

Die örtlichen Kenntnisse nehmen mit zunehmendem Ausrückegebiet ab. Freiwillige Feuerwehren eines kleinen Ausrückegebietes, in dem entsprechend nur wenige Industriebetriebe liegen, verfügen ähnlich den Werkfeuerwehren über bessere örtliche Kenntnisse als Großstadtfeuerwehren.

Berufsfeuerwehren haben artbedingt kürzere Alarmierungszeiten als Freiwillige Feuerwehren. Die Anfahrtszeit, die zwischen dem Ausrücken aus der Feuerwache und dem Eintreffen am Brandobjekt vergeht, ist bei Freiwilligen Feuerwehren aufgrund des kleineren Ausrückebereichs und oftmals verkehrsbedingter Vorteile kürzer als die von Großstadtwehren.

Die Alarmierung ehrenamtlicher Kräfte ist werktags problematisch, weil die Mitglieder Freiwilliger Feuerwehren oftmals außerhalb des Alarmierungsbereichs ihrem Beruf nachgehen. Wenn derartige Probleme auftreten, wird von einer übergeordneten Zentrale zunächst eine Nachalarmierung im Alarmierungsbereich vorgenommen, die auf andere Bereiche erweitert wird (Nachbarschaftshilfe), sofern von der ausrückenden Wehr eine Rückmeldung über fehlende Kräfte erfolgt. Die Nachalarmierung anderer Wehren ist ebenfalls nötig, wenn die Leistungsfähigkeit (Kräfte und/oder Gerätschaften) der erstalarmierten Wehr überfordert wird. Für bestimmte Industriebetriebe oder Objekte kann eine Ausrückeordnung festgelegt werden, die bei einem Alarm in diesem Betrieb sofort mehrere Züge, Feuerwehren oder Spezialfahrzeuge bzw. -geräte ausrücken läßt.

Fahrzeuge und Gerätschaften, die von einzelnen Kommunen finanziell nicht unterhalten werden können oder deren Einsatzhäufigkeit eine Unterhaltung nicht rechtfertigen würde, werden

von übergeordneten Wehren (Stützpunkt- oder Schwerpunktwehren) bereitgestellt. Es handelt sich oftmals um Spezialfahrzeuge, für die besonders ausgebildetes Personal sofort einsatzbereit ist oder durch Funkmeldeempfängern alarmiert wird. Die Anrückezeiten sind mit denen von Großstadtfeuerwehren vergleichbar.

Aus der Brandmeldung geht häufig nicht das Ausmaß des Brandes sowie seine Entwicklung hervor. Die anrückende Einheit erkennt die Brandausdehnung und wird der Zentrale ggf. den Bedarf weiterer Löschkräfte mitteilen. Manche Städte, deren Feuerwehr aus ehrenamtlichen Mitgliedern gebildet wird, können gezielt auf einzelne Einsatzgruppen ihrer Feuerwehr zugreifen. Diese Gruppen weisen entsprechend ihrer Verfügbarkeit unterschiedliche Alarmierungszeiten auf. Die Alarmierungsform kann als "Schleifenalarmierung" bezeichnet werden und setzt eine gewisse Organisationsstruktur innerhalb der Feuerwehr voraus.

Weitere Verzögerungen entstehen, wenn die zuständige Feuerwehr zum Alarmierungszeitpunkt gerade einen anderen Einsatz hat. Die alarmierte Nachbarwehr braucht in diesem Fall voraussichtlich mehr Zeit zum Anrücken und verfügt noch weniger über örtliche Kenntnisse als die zuständige öffentliche Feuerwehr.

Die Faktoren, die Einfluß auf den Zeitbedarf für den Aufbau des Löschangriffs haben, wurden bereits im Teilsystem "Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr" beschrieben. Einen günstigen Einfluß übt die Erstbekämpfung durch eine betriebliche Feuerwehr aus, weil deren Einsatzleiter Informationen sofort an den Einsatzleiter der öffentlichen Feuerwehr weitergeben kann. Die Übernahme bereits von der betrieblichen Feuerwehr bezogener Löschwasserentnahmestellen (im Modell max. 2 Entnahmestellen, ergeben sich aus der Anzahl der Pumpen in einem LF) verkürzt die Aufbauzeiten für den Löschangriff und ist möglich, weil Ausrüstungsgegenstände bis auf ein nicht zu vernachlässigendes Detail genormt sind. Der Anschluß des

Unterflurhydranten an das Standrohr hat bei Betrieben mit einer anerkannten Werkfeuerwehr gegenüber dem sonstigen Wirkungsbereich der öffentlichen Feuerwehr unterschiedlich genormte Nennweiten (Werkfeuerwehr: DN 100; öffentliche Feuerwehr: DN 80). Diese Tatsache wird auf die Auslegung für einen erhöhten Wasserbedarf bei der Brandbekämpfung eines Industriebetriebes zurückgeführt. Inwiefern diese Normung bei der Einrichtung von Unterflurhydranten Beachtung findet, ist nicht bekannt. Hält die Werkfeuerwehr nicht genügend Standrohre mit der Anschlußnennweite DN 100 bereit, können die betriebseigenen Unterflurhydranten nicht voll genutzt werden. Das Vorhalten oder Mitführen größerer Standrohre wird für die öffentliche Feuerwehr ausgeschlossen.

Das Auffinden der Löschwasserentnahmestellen im Löschbereich kann besonders nachts zu erheblichem Zeitverzug führen, wenn weder eine betriebliche Feuerwehr Auskunft über deren Lage geben kann, noch Einsatzpläne für das Objekt verfügbar sind. Das Verstellen der Löschwasserentnahmestellen bzw. deren Ausschilderung macht das Auffinden nahezu unmöglich. Im Gegensatz zum Teilsystem "Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr" wird hier nicht nur die Löschwasserversorgung im Löschbereich (im Umkreis von 300 m um das Brandobjekt) betrachtet. Die öffentliche Feuerwehr ist aufgrund größeren Materialvorrats in der Lage, eine Löschwasserförderung über längere Strecken aufzubauen. Der Zeitbedarf dafür wird jedoch erheblich sein, weil Nachalarmierungen erforderlich werden oder zumindest Kräfte für den Aufbau der Löschwasserversorgung abgezogen werden müssen, die sonst zu Löschzwecken eingesetzt werden könnten.

Im Rahmen der Ermittlung einer Ausfallwahrscheinlichkeit für die Brandbekämpfungsmaßnahmen der öffentlichen Feuerwehr ist die Frage zu stellen, wann ihr Einsatz überhaupt versagt. Ein völliger Ausfall der Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr wird aufgrund verfügbarer Mittel und Kräfte als sehr

unwahrscheinlich angenommen. Diese Frage muß daher schutzzielorientiert beantwortet werden. So kann beispielsweise beim Versagen des Brandbekämpfungsabschnitts (BBA) das Versagen der Löschmaßnahmen und damit auch das Versagen der öffentlichen Feuerwehr festgestellt werden.

Ein Versagen des BBA wird mit großer Wahrscheinlichkeit eintreten, wenn die Feuerwehr nicht alarmiert wird oder - trotz Wasserförderung über lange Wegstrecke - keine ausreichende Löschwasserversorgung gegeben ist. Die Alarmierung der öffentlichen Feuerwehr wird direkt auf das Teilsystem der Brandmeldung zurückgeführt, d.h. erfolgt keine Brandmeldung, dann bleibt auch die Alarmierung der öffentlichen Feuerwehr aus. Störungen von Übermittlungswegen werden nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, daß eine erfolgreiche Brandmeldung irgendwann auch die öffentliche Feuerwehr erreicht. Ob die öffentliche Feuerwehr zum Alarmierungszeitpunkt noch eine erfolgreiche Brandbekämpfung vornehmen kann, ist vom nächsten Aspekt abhängig.

Überschreitet der Brand eine im Modell festgelegte Grenzen, wird angenommen, daß der Brandbekämpfungsabschnitt durch die öffentliche Feuerwehr nicht mehr zu retten ist. Dem Einsatzleiter der öffentlichen Feuerwehr wird dieser Umstand sicherlich nicht verborgen bleiben, sodaß er nach Abschätzung der Lage seine Taktik ändern wird und ein Übergreifen des Brandes auf angrenzende Bereiche bzw. Gebäude zu verhindern suchen wird. Die Festlegung der maßgebenden Brandausbreitungsfläche erfolgt in Abschnitt 4.

3.9 Die Brandabschnittsbegrenzung

Ein Brandbekämpfungsabschnitt (BBA) ist nach DIN 18230 /1/ ein gegenüber anderen Gebäudeteilen brandschutztechnisch abgeschlossener Gebäudeteil, der sich in Abhängigkeit der Brand-

schutzklasse auf höchstens 4 Geschosse erstrecken sollte. Den Erfordernissen nach größeren Brandwandabständen wird damit in DIN 18230 Rechnung getragen.

Tabelle 3.19 Zeitinvariante und zeitvariante Versagensereignisse des Teilsystems "Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr"

Ereignis	Versagenswahrscheinlichkeit
zeitinvariante Versagensereignisse	
ungenügende Löschwasserversorgung	$1 \cdot 10^{-3}$ ¹⁾
zeitvariante Versagensereignisse	
Versagen der Brandbekämpfung infolge zu großer Brandausbreitung	- ²⁾
¹⁾ eigene Schätzung	²⁾ vgl. Abschnitt 4.4

Der Abschluß von Brandbekämpfungsabschnitten wird nach DIN 18230 durch Bauteile der Brandsicherheitsklasse SK_b 3 erzielt, deren Feuerwiderstandsklasse sich aus der Festlegung der Brandschutzklasse für den betrachteten Brandbekämpfungsabschnitt ergibt. Wände und Decken, die Brandbekämpfungsabschnitte voneinander trennen, müssen mindestens der Feuerwiderstandsklasse F 30-A angehören. Daraus folgt, daß Wände keine Brandwände im Sinne von DIN 4102, Teil 3 sind ($\geq F 90$). Da die Wände jedoch wie Brandwände geprüft werden müssen, dürfte eine Unterscheidung in der Regel nur theoretischer Natur sein.

Das Versagen der brandabschnittsbegrenzenden Bauteile wird ebenso wie das der raumabschließenden Bauteile nicht allein durch ihre Feuerwiderstandsdauer bestimmt, sondern ist auch von der Feuerwiderstandsdauer und der Einhaltung der Einbaubestimmungen von Feuerschutzabschlüssen und Sonderbau-

teilen abhängig. Daraus ergeben sich für die Brandabschnittsbegrenzung die gleichen Versagensmechanismen, wie sie bereits für das Teilsystem "Raumabschluß" festgelegt wurden.

Die zeitinvarianten Versagensereignisse werden sich gegenüber denen des Teilsystems "Raumabschluß" nicht ändern. Die Ermittlung der zeitvarianten Versagensereignisse, für die ohnehin je nach Art der Systemanalyse spezielle Vorgaben gemacht werden müssen, erfolgt in Abschnitt 4. Daher wird an dieser Stelle auf eine Darstellung der einzelnen Versagensereignisse verzichtet und auf Abschnitt 3.3 verwiesen.

4 ERMITTLUNG DER ZEITVARIANTEN VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEITEN DER TEILSYSTEME

4.1 Allgemeines

Zeitvariante Versagenswahrscheinlichkeiten von Ereignissen ergeben sich aus dem betrachteten Brandverlauf und sind insbesondere von dem temperaturabhängigen Ansprech- oder Versagenverhalten einzelner Funktionselemente abhängig.

Brandschutzmaßnahmen wie das Öffnen von Rauchabzügen durch Schmelzlotauslöser werden bekanntlich erst eingeleitet, wenn das Metall infolge Temperatureinwirkung in einen flüssigen Aggregatzustand übergeht, das Schmelzlot also versagt (Fail-Save-Prinzip). Der Begriff "Versagenswahrscheinlichkeit" beschreibt für derartige Ereignisse den Sachverhalt nicht ausreichend, da unter dem Versagen eines Schmelzlotauslösers auch das Ausbleiben der Auslösung verstanden werden könnte. Für derartige Funktionselemente eignet sich der Begriff "Ansprchwahrscheinlichkeit" besser zur Beschreibung des Ereignisses. Die Ansprechwahrscheinlichkeit ist identisch der Versagens-

wahrscheinlichkeit anderer nicht Fail Save-Elemente und wächst mit zunehmender Zeit. Soll für Fail Save-Elemente ein Versagensereignis definiert werden, ist zusätzlich die Angabe über den vorausgehenden oder den folgenden Funktionszustand ratsam.

Statistische Daten für zeitvariante Ereignisse sind, wenn überhaupt, nur schwer zugänglich und müssen immer mit dem individuellen Brandverlauf, zu dem sie ermittelt wurden, gesehen werden. Die konservative Annahme zeitkonstanter Ausfallwahrscheinlichkeiten kann für die Systemanalyse nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen. Die Erfassung und Beschreibung des temperaturabhängigen Verhaltens der Funktionselemente ist erforderlich, um das Systemverhalten während eines Brandes beschreiben zu können.

Die Ermittlung der zeitvarianten Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt mit dem Programmsystem FORM (First Orders Reliability Method) /16/. Die ursprüngliche Programmversion, die in der interaktiven Form nur stationäre Versagenswahrscheinlichkeiten ermitteln konnte, wurde geringfügig modifiziert, um eine Ermittlung mit dem Zeitschrittverfahren vornehmen zu können. Die Grundgedanken dieser Zuverlässigkeitsanalyse waren davon nicht betroffen und sollen im folgenden kurz vorgestellt werden.

FORM eignet sich zur näherungsweise Berechnung allgemeiner Wahrscheinlichkeitsintegrale, die lokal differenzierbar sind. Der Zustand eines technischen Systems wird durch eine Funktion mehrerer Variablen beschrieben, von denen einige abhängige oder unabhängige Zufallsvariable darstellen. Als technisches System wird beispielsweise ein einfach gelagerter Stahlbetonbalken verstanden, der durch eine Einzellast F und durch eine instationäre Temperaturbeanspruchung belastet wird. Als Zufallsvariablen dieses Systems könnten die Last F , die Temperatur ϑ zum Zeitpunkt t , die Druck- und Zugfestigkeiten sowie E-Moduli von Beton und Stahl und die Abmessungen des Balkens

definiert werden. Die Lage der Bewehrung könnte als weitere nicht streuende Variable eingeführt werden. Die Beton- und Stahlfestigkeiten müssen darin in Abhängigkeit von der Temperatur im Balkenquerschnitt gesehen werden.

Für den Funktionszustand dieses Systems wird in FORM eine angenäherte Lösung ermittelt. Die Zufallsvariablen des Vektors $\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ werden auch als Basisvariablen bezeichnet. Mit gegebener Verteilungsfunktion beschreiben sie das stochastische Modell. Die Verteilungsfunktion muß wenigstens lokal differenzierbar sein, sodaß die zugehörige Verteilungsdichte ermittelt werden kann. Die Zustandsfunktion des Systems (mindestens einfach differenzierbar) wird mit $g(\underline{X})$ bezeichnet.

Für das oben genannte Beispiel wird in der Zustandsfunktion $g(\underline{X})$ die vom Stahlbetonbalken aufnehmbare Last F_u der einwirkenden Last F gegenübergestellt. Für $g(\underline{X}) > 0$ gilt das System als intakt, $g(\underline{X}) = 0$ beschreibt den Grenzzustand und für $g(\underline{X}) < 0$ wird der Versagensbereich des Systems definiert. Die systembeschreibende Zustandsfunktion, auch Grenzfunktion genannt, kann als ein Algorithmus aufgefaßt werden, der die Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände nach beliebigen Bemessungsverfahren selbst vornimmt. FORM setzt lokales monotonen Verhalten der Grenzfunktion $g(\underline{X})$ für jede Zufallsvariable des Vektors \underline{X} voraus. Aus den gegebenen Informationen wird folgende Näherung berechnet:

$$P_f = P(\underline{X} \in F) = P(g(\underline{X}) \leq 0) = \int_{g(\underline{x}) \leq 0} dF_{\underline{X}}(\underline{x}) \quad (4.1)$$

mit

P_f	-	Versagenswahrscheinlichkeit des Systems
\underline{X}	-	Vektor der Zufallsvariablen bzw. Basisvariablen
$F_{\underline{X}}(\underline{x})$	-	Verteilungsfunktionen der Basisvariablen
$g(\underline{X})$	-	Grenzfunktion der Basisvariablen

Diese Näherung folgt aus der Transformation der nicht gauß-normalverteilten Basisvariablen in unabhängige standardnormalverteilte Variable, einer Optimierungsprozedur am sogenannten Versagenspunkt β (auch Bemessungspunkt) durch Linearisierung der Grenzfunktion in diesem Punkt und durch Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit unter Zuhilfenahme des Integrals der Standardnormalverteilung (Gleichung 4.2).

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \quad (4.2)$$

und

$$\beta = \min \{|\underline{u}|\} \quad \text{für } \{\underline{u}: g(\underline{u}) \leq 0\} \quad (4.3)$$

mit

P_f	-	Versagenswahrscheinlichkeit des Systems
Φ	-	Standardnormalverteilung
β	-	Bemessungspunkt bzw. (geometrischer) Sicherheitsindex
\underline{u}	-	Vektor unabhängiger standardnormalverteilter Variabler
$ \underline{u} $	-	Betrag bzw. Länge des Vektors \underline{u}
$g(\underline{u})$	-	Grenzfunktion der standardnormalverteilten Variablen.

4.2 Temperaturbedingtes Versagen passiver Brandschutzmaßnahmen

4.2.1 Überblick

Die passiven Brandschutzmaßnahmen umfassen sämtliche baulichen Vorkehrungen, die eine Brandausbreitung behindern oder begrenzen. Feuerwiderstandsfähige Bauteile, wie sie im Abschnitt 3.3 beschrieben wurden, weisen gemäß Normbrandprüfung unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern auf. Aus diesen Normbrandprüfungen können Parameter ermittelt werden, mit denen die einzelnen Bauteilgruppen statistisch beschrieben werden können. Für diese Arbeit werden als die wichtigsten Daten der Norm-

brandprüfungen die Zeitpunkte angesehen, zu denen nach Definition von DIN 4102 das Versagen der Bauteile in einem Prüfkriterium festgestellt wurde und somit zur Klassifizierung der Bauteile in verschiedene Feuerwiderstandsklassen führte. Diese Betrachtungsweise ist nicht in der Lage, die Gewichtigkeit einzelner Prüfkriterien zu unterscheiden. Eine Bewertung der Kriterien kann und soll hier allerdings auch nicht vorgenommen werden, zumal ohnehin nur wenige Daten zugänglich waren.

4.2.2 Sonderbauteile

In /3/ sind Ergebnisse einzelner Normbrandprüfungen veröffentlicht, aus denen die zur Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten erforderlichen Daten entnommen werden. Die Anzahl von Prüfungen zur Ermittlung statistischer Kennwerte ist allerdings sehr begrenzt, sodaß eine repräsentative Aussage über das Versagen der Bauteile angezweifelt werden muß. Eine Auswertung von mehr Normbrandversuchen könnte diesen Mißstand beseitigen. Aus der guten Dokumentation der Versuchsergebnisse werden die nötigen Daten selbst ermittelt. Der Versagenszeitpunkt wird als Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung für die folgenden Sonderbauteile ermittelt :

- leichte Trennwände,
- Kabelschotts,
- Brandschutztüren,
- Brandschutzklappen.

Mit den ermittelten Daten könnte für jede Feuerwiderstandsklasse und für jedes Sonderbauteil die zeitvariante Versagenswahrscheinlichkeit berechnet werden. Dieses Vorgehen setzt genügend Eingangsdaten voraus und mündet in diversen tabellarischen oder grafischen Darstellungen. Um die Unabhängigkeit von der Feuerwiderstandsklasse der Bauteile zu erreichen, wird wie folgt vorgegangen:

- Es wird eine Bezugsfeuerwiderstandsklasse für das betrachtete Bauteil bestimmt, auf die alle anderen Feuerwiderstandsklassen bezogen werden. Durch Multiplikation des Versagenszeitpunktes einzelner Prüfungen mit dem Verhältniswert Bezugs-/Feuerwiderstandsklasse wird die Bezugsfeuerwiderstandsdauer des Bauteils ermittelt.

Bsp.: Bezugsfeuerwiderstandsklasse: F 90
Feuerwiderstandsklasse des Bauteils: F 30
Versagenszeitpunkt des Bauteils: 34 min
Bezugsfeuerwiderstandsdauer des Bauteils:
 $(90 / 30) \cdot 34 = 102 \text{ min.}$

- Aus diesen Werten werden die statistischen Kennwerte Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient für die einzelnen Sonderbauteile ermittelt.
- Als weiterer wichtiger Eingangsparameter zur Ermittlung temperaturabhängiger Versagenswahrscheinlichkeiten dient der untere Fraktilwert der Bezugsfeuerwiderstandsdauer der Sonderbauteile (Gl. 4.6). Als Verteilungsfunktion wird die Normalverteilung angenommen.

$$x_u = \mu - z \cdot \sigma \quad (4.4)$$

$$z = (x_u - \mu) / \sigma \quad (4.5)$$

$$P(-\infty < Z < -z) = \Phi(z) = F_z(-z) \quad (4.6)$$

mit

x_u	- untere Intervallgrenze (Bezugsfeuerwiderstandsklasse)
z	- tabellierter Wert für die Standardnormalverteilung
μ	- Mittelwert der Bezugsfeuerwiderstandsdauer, Erwartungswert
σ	- Standardabweichung der Bezugsfeuerwiderstandsdauer

$F_z(-z), \Phi(z)$ - Funktionswert, Wahrscheinlichkeit bzw.
 $P(-\infty < Z < -z)$ Fraktilwert der Standardnormalverteilung an
der Stelle $-z$.

Für die Sonderbauteile ergeben sich damit die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte. Auf eine Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen wurde bewußt verzichtet, weil im folgenden nur noch globale Eingangswerte zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten dienen sollen. Damit wird es möglich, für alle Feuerwiderstandsklassen eines Bauteils nur eine Funktion betrachten zu müssen.

Tabelle 4.1 Variationskoeffizienten und Fraktilwerte einzelner Sonderbauteile

Sonderbauteil	Variationskoeffizient [-]	Fraktilwert [%]
leichte Trennwände	0,0772	5,1
Kabelschotts	0,1489	13,2
Brandschutztüren	0,1919	12,6
Brandschutzklappen	0,2735	23,8

Die Untersuchung der einzelnen Sonderbauteile mit Hilfe von FORM /16/ bedarf im nächsten Schritt der Definition der zu betrachtenden Grenzfunktion. Durch die Festlegung einer beliebigen Feuerwiderstandsklasse (Fraktilgrenzwert) unter Berücksichtigung der bauteilspezifischen Kennwerte kann der Widerstand der Bauteile bei einer Normbrandprüfung berechnet werden. Er ergibt sich aus dem Integral der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK, Gl. 4.7) über die Zeit (von $t=0$ bis $t=t_{FWK}$) und kann als ertragbare "Wärmeenergie" des Bauteils aufgefaßt werden (Gl. 4.8). Der Verlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve (Gl. 4.7) ist in Bild A9 des Anhangs dargestellt. Als Einwirkung wird die in einer bestimmten Zeit freigesetzte "Energie"

ebenso als Integral der ETK über die Zeit (von $t=0$ bis $t=t^*$ =Betrachtungszeitpunkt) festgelegt (Gl.4.9). Unabhängig von dieser Arbeit wurde die Möglichkeit der Definition von Widerständen und Einwirkungen bereits in /3/ vorgeschlagen.

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (4.7)$$

$$E = \int_{t=0}^{t=t_{FWK}} \vartheta(t) dt \quad (4.8)$$

$$E = \int_{t=0}^{t^*} \vartheta(t) dt \quad (4.9)$$

mit

- | | | |
|----------------|---|--|
| E | - | gesamte freigesetzte Wärmeenergie in K·min |
| $\vartheta(t)$ | - | Brandraumtemperatur zum Zeitpunkt t in K |
| ϑ_0 | - | Temperatur der Probekörper zum Zeitpunkt $t=0$ in K, ($\vartheta_0 \approx 293$ K bzw. 20°C) |
| t, t^* | - | Zeitdauer in min |
| t_{FWK} | - | Feuerwiderstandsklasse als Zeitdauer in min. |

Die Einhaltung des rechnerischen Temperaturverlaufs der ETK gelingt im Versuch nur schwer und kann durch Steuerung der Brennstoffzufuhr sowie der Abzugsverhältnisse im Normbrandofen kontrolliert werden. Kurzfristige Abweichungen der Temperatur-Zeitkurve im Normbrandversuch zur ETK sind besonders zu Beginn eines Versuchs unvermeidbar. Aufgrund des zunehmend flacher verlaufenden Astes der ETK werden in DIN 1045, Teil 2 folgende zulässige Abweichungen festgelegt :

$t \leq 30$ min: ± 10 %

$t > 30$ min: ± 5 %.

Diese Abweichungen werden wie in /3/ als Variationskoeffizienten interpretiert, mit denen die Ermittlung der streuenden Einwirkungen vorgenommen wird. Wie eingangs erläutert, wird von einer Darstellung für einzelne Feuerwiderstandsklassen Abstand genommen; statt dessen werden die Ergebnisse in bezogener Form angegeben. Daher kann auch der Wechsel des Variationskoeffizienten der ETK nicht zu einem festgelegten absoluten Zeitpunkt erfolgen, sondern wird bei 1/6 der Feuerwiderstandsklasse des Bauteils definiert. Bei einem F 30-Bauteil entspricht dies der Zeit $t=5$ min. Die Grenzfunktion läßt sich somit wie folgt darstellen (Gl. 4.10):

$$g(\underline{X}) = \int_{t=0}^{t=t_{FWK}} \vartheta(t) dt - \int_{t=0}^{t^*} \vartheta(t) dt. \quad (4.10)$$

Zwischen den Basisvariablen "Feuerwiderstandsklasse" und "ETK" wird eine Korrelation von $r=+0,5$ angenommen. Damit wird berücksichtigt, daß mit zunehmender Brandbeanspruchungsdauer auch die Feuerwiderstandsklasse der Bauteile steigt. Ein Korrelationskoeffizient $r=+1,0$, wie er nach der hier vorgeschlagenen Berechnung von Einwirkungen und Widerständen folgt, wird nicht berücksichtigt, weil die Basisvariablen streng genommen von weiteren Faktoren (Brandverlauf, Feuchtigkeitsgehalt, etc.) abhängig sind, die nicht erfaßt werden.

Die Rechenergebnisse sind in den Bildern 4.1 und 4.2 dargestellt. Aus Bild 4.1 sind die absoluten Versagenswahrscheinlichkeiten der auf die Feuerwiderstandsklasse der Sonderbauteile bezogenen Zeit in logarithmischer Darstellung zu entnehmen. Der Übergang des Variationskoeffizienten der ETK von $v_{ETK}=0,10$ zu $v_{ETK}=0,05$ macht sich besonders bei geringen Versagenswahrscheinlichkeiten durch einen Sprung im Kurvenverlauf bemerkbar. Bei zunehmender absoluter Versagenswahrscheinlichkeit ist der Sprung so gut wie nicht mehr wahrnehmbar (vgl. Brandschutzklappen). Eine konstante Änderung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Ereignisse wird durch die Änderung

des Variationskoeffizienten der ETK allerdings nicht verursacht; bei den Brandschutztüren beträgt der Sprung ca. $4 \cdot 10^{-7}$, während er bei den Kabelschotts um drei Zehnerpotenzen kleiner ist ($\approx 4 \cdot 10^{-10}$).

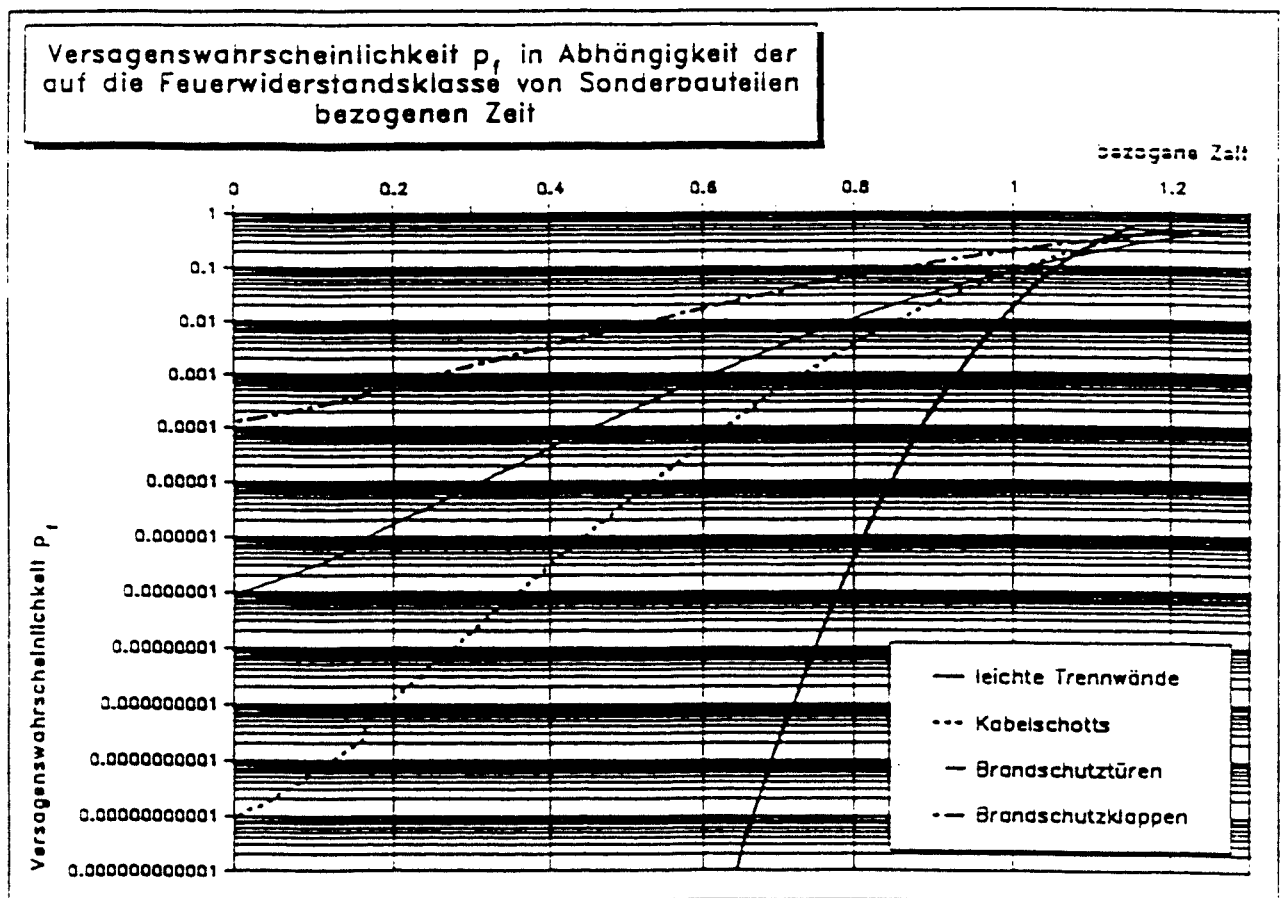


Bild 4.1 Versagenswahrscheinlichkeit p_f von Sonderbauteilen

Versagenswahrscheinlichkeiten kleiner $1 \cdot 10^{-6}$, die in etwa der Auftretshäufigkeit allgemeiner Brände pro Quadratmeter und Jahr entsprechen, sind im Rahmen der Systemanalyse kaum von Bedeutung. Daher wird auf eine Berücksichtigung differenzierter Variationskoeffizienten der ETK verzichtet. Die daraus

resultierende stetige Kurve kann durch ein logarithmisches Polynom beschrieben werden.

Die logarithmische Darstellung ermöglicht zwar einen anschaulichen Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Ereignisse, die absolute Größe der Versagenswahrscheinlichkeit und die Vielzahl der nötigen Achsendarstellungen schränken die Anwendbarkeit logarithmischer Diagramme jedoch ein. Die in Bild 4.2 gewählte Darstellung über den Sicherheitsindex β (Gl. 4.2), der sich aus dem Quotienten m_z/σ_z von Mittelwert m_z

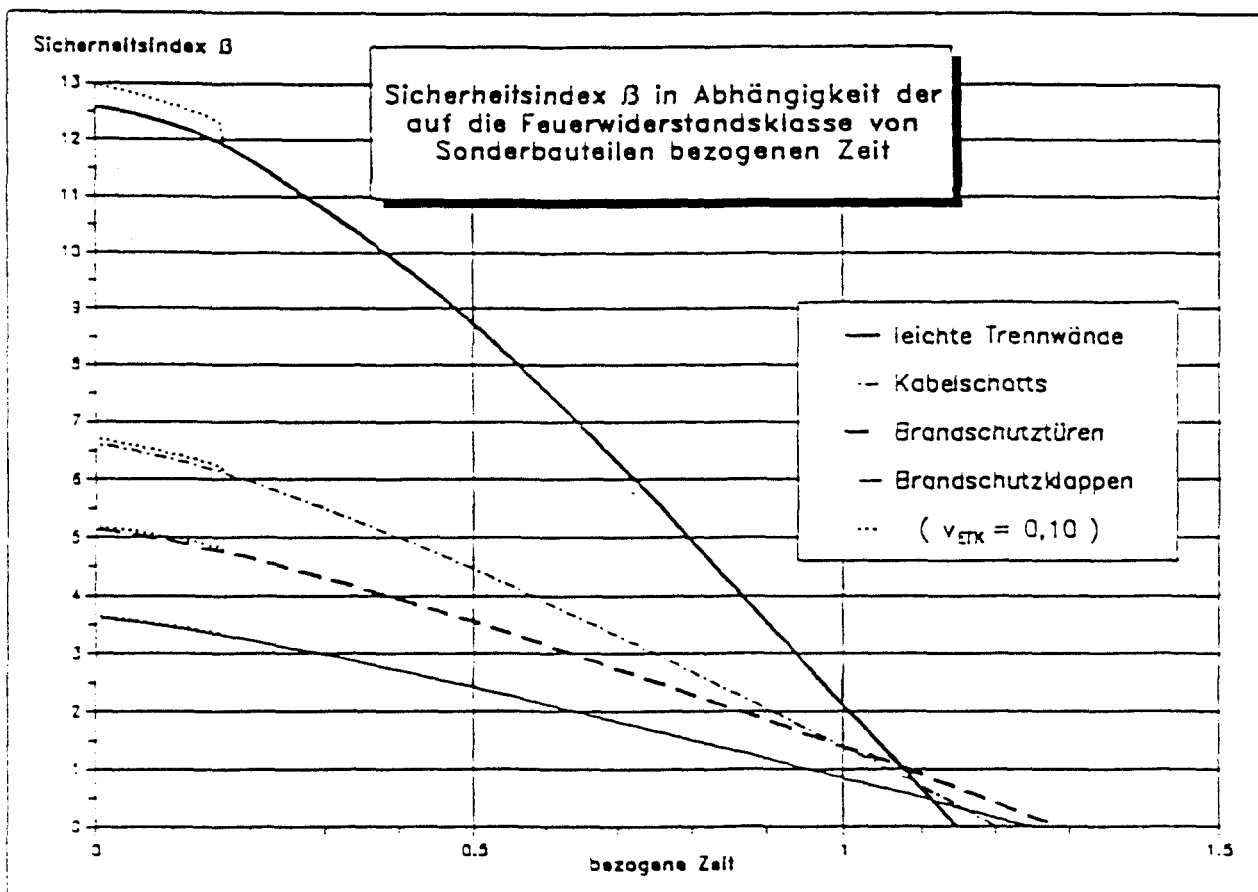


Bild 4.2 Sicherheitsindex β von Sonderbauteilen

und Standardabweichung σ_z der Grenzfunktion ergibt, erscheint hier weitaus geeigneter. Die gewohnte Größenangabe der Wahrscheinlichkeitsrechnung kann näherungsweise aus Tabellen der Standardnormalverteilung oder aus den Bildern A10 und A11 des Anhangs entnommen werden. Für die spätere Systemanalyse mit dem Programm SYSREL /17/ wird nur der Sicherheitsindex β als Eingangsparameter benötigt.

In Bild 4.2 sind die Kurven im Bereich kleiner $1/6$ der bezogenen Zeit bereits um den Betrag des Sprunges verringert worden. Die punktierten Linien sollen den ursprünglichen Verlauf andeuten.

Die Näherung dieser Kurven ist durch ein Polynom 2. Grades ausgesprochen gut möglich. Nur im Bereich sehr kleiner Versagenswahrscheinlichkeiten ergeben sich Abweichungen von bis zu $\Delta\beta \approx 0,4$, die für die Systemanalyse keine Rolle spielen. Die Gegenüberstellung von Näherung und berechnetem Verlauf erfolgt in Bild A12 des Anhangs. Die Koeffizienten des Polynoms (Gl. 4.11) für die einzelnen Sonderbauteile enthält Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2 Koeffizienten des Näherungspolynoms für den Sicherheitsindex β von Sonderbauteilen

Sonderbauteil	a	b	c
leichte Trennwände	12,944	-6,169	-4,656
Kabelschotts	6,744	-3,809	-1,543
Brandschutztüren	5,233	-2,904	-0,939
Brandschutzklappen	3,683	-2,238	-0,598

$$\beta = a + b \cdot t_{\text{bez}} + c \cdot t_{\text{bez}}^2 \quad (4.11)$$

mit

- β - Sicherheitsindex
- a, b, c Koeffizienten des Polynoms
- t_{bez} - auf die Feuerwiderstandsdauer bezogene Zeit.

Die Ermittlung zeitvarianter Sicherheitsindices von Sonderbauteilen erfolgt nach folgendem Schema:

1. Festlegung: Zeitpunkt der Systemanalyse
2. Festlegung: Art und Feuerwiderstandsklasse des Sonderbauteils
3. Berechnung: auf die Feuerwiderstandsklasse bezogene Zeit
4. Bestimmung: Sicherheitsindex β aus Bild 4.2 oder nach Näherungsformel Gl. 4.11 (ggf. Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit p_f)

Beispiel :

1. Analysezeitpunkt: $t = 54 \text{ min}$
2. Sonderbauteil: Brandschutztür T 90
3. bezogene Zeit: $t_{\text{bez}} = 54 / 90 = 0,6$
4. Sicherheitsindex β und Versagenswahrscheinlichkeit p_f
 - a) aus Diagramm (Bild 4.2): $\beta = 3,15$
 - b) aus Näherungsformel (Gl. 4.11, Tab. 4.2): $\beta = 3,153$
 - c) aus Diagramm (Bild A10): $p_f = 9 \cdot 10^{-4}$.

4.2.3 Tragende Bauteile

Die Feuerwiderstandsfähigkeit tragender Bauteile wird durch die Aufgabe, die das Bauteil erfüllen soll, maßgebend beeinflusst. Wände und Decken werden vorwiegend einseitig vom Brand beansprucht, während Stützen und Balken dem Feuer meist mehrseitig ausgesetzt sind. Auch die Lastbeanspruchung (Biege-

bauteil, Druck- oder Zugglied) sowie die Bauteilart (Stahlbeton-, Stahl- oder Holzbauteil) werden die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile beeinflussen. Daher scheint eine differenzierte Betrachtung, wie sie bereits im Abschnitt 4.2.2 vorgenommen wurde, auch hier sinnvoll zu sein. Aus Normbrandprüfungen könnten für jedes Bauteil unter unterschiedlichen Lastbeanspruchungen für die einzelnen Materialien statistische Kennwerte abgeleitet werden, mit denen Kurven für die zeitvarianten Sicherheitsindices bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Das setzt allerdings umfangreiches Datenmaterial voraus und führt zu einer Systemanalyse, in der möglicherweise jedes Bauteil einzeln untersucht wird.

Im Rahmen dieses Modells soll eine Einteilung in die drei Bauteilarten genügen. In Prüfungen wurde festgestellt, daß in einem gewissen Umfang eine Korrelation zwischen Variationskoeffizient und Bauteilart besteht. Danach haben Stahlbetonbauteile den geringsten Variationskoeffizienten, es folgen die Stahlbauteile und das Schlußlicht bilden die Holzbauteile.

Das Schema, nach dem zeitvariante Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt werden, läuft ähnlich dem von Abschnitt 4.2.2 ab. Auf die Auswertung von Normbrandprüfungen muß mangels Daten verzichtet werden. Aus unveröffentlichten Angaben über den Streubereich der Variationskoeffizienten sowie der Ausfallhäufigkeit einzelner Bauteilarten während der Normbrandprüfung werden Annahmen über den Mittelwert der Variationskoeffizienten und der Fraktilwerte getroffen. Es wird festgelegt:

- Stahlbetonbauteile:	$V_{SB} = 0,10$	-	10 % Fraktile
- Stahlbauteile:	$V_S = 0,15$	-	10 % Fraktile
- Holzbauteile:	$V_H = 0,20$	-	10 % Fraktile

Weil aus den gegebenen Daten keine Feuerwiderstandsdauern hervorgehen, muß im Gegensatz zu Abschnitt 4.2.2 ausgehend von

dem Fraktilgrenzwert (Bezugsfeuerwiderstandsklasse) die Bezugsfeuerwiderstandsdauer ermittelt werden. Die Festlegung einer expliziten Feuerwiderstandsdauer ist nicht nötig, weil auch hier die auf die Feuerwiderstandsklasse bezogene Zeit dargestellt wird.

Als Korrelationskoeffizient zwischen den Basisvariablen wird wieder der Wert $r=+0,5$ gewählt. In Abschnitt 4.2.2 wurde gezeigt, daß der Variationskoeffizient V_{ETK} im Bereich der hier interessierenden Versagenswahrscheinlichkeiten keinen nennenswerten Einfluß hat. Daher wird einheitlich ein Variationskoeffizient $V_{ETK}=0,05$ gewählt. Ebenso wird auf die Darstellung der Versagenswahrscheinlichkeiten im logarithmischen Maßstab verzichtet. Die Ergebnisse enthalten Bild 4.3 und Tabelle 4.3. Die Berechnung des Sicherheitsindex β erfolgt analog zu Abschnitt 4.2.2.

Tabelle 4.3 Koeffizienten des Näherungspolynoms für den Sicherheitsindex β von Bauteilen

Bauteil	a	b	c
Stahlbeton	10,120	-5,699	-2,960
Stahl	6,745	-3,966	-1,440
Holz	5,060	-2,977	-0,849

4.3 Temperaturbedingtes Versagen anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen

Zu den anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen zählen alle Maßnahmen, die im Anforderungsfall von Anlagen eingeleitet werden oder während des Brandes aktiv sind. Insbesondere sind dies Brandmeldeanlagen und Löschhilfeanlagen bzw. Komponenten von ihnen. In Ergänzung zu den bereits in Abschnitt 3 festgelegten Versagenswahrscheinlichkeiten anlagentechnischer Brand-

schutzmaßnahmen werden im folgenden die Ereignisse betrachtet, die zu einem temperaturbedingten Versagen dieser Anlagen führen.

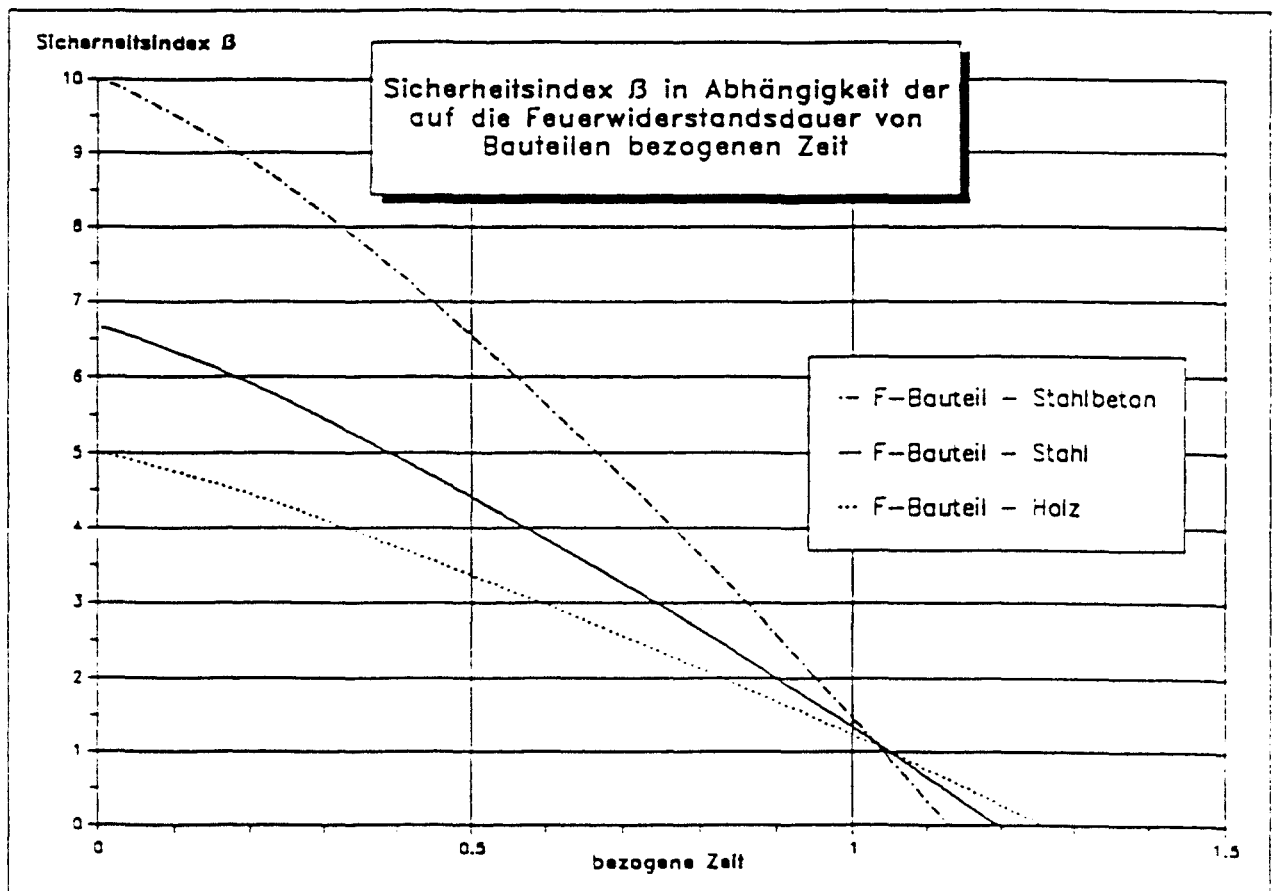


Bild 4.3 Sicherheitsindex β von Bauteilen

Die Herleitung zeitvarianter Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. Sicherheitsindices wird wie in Abschnitt 4.2 mit Hilfe ertragbarer Wärmeenergien vorgenommen. Die dafür notwendigen Daten sind ausgehend von der untersuchten Maßnahme in unterschiedlicher Güte zugänglich. Das Ansprechen von Schmelzlot-auslösern oder Flüssigkeitsgläsern wird relativ genau anzuge-

ben sein, während die Ausfalltemperatur von Rohrleitungen zur Wasserversorgung der Löschhilfeanlagen oder die Ausfalltemperatur der Schaltschränke von Brandmeldeanlagen nur grob abgeschätzt werden können.

Ausgehend von den Überlegungen in Abschnitt 4.2 werden nicht einzelne Anlagen oder gar deren Komponenten betrachtet, sondern Sicherheitsindices für beliebige Ereignisse ermittelt, für welche die Versagenstemperatur als Fraktilgrenzwert und der Variationskoeffizient bekannt sein müssen. Die Einwirkungen werden wieder durch das Integral der ETK ($v_{ETK}=0,05$) simuliert.

Für die anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen wird keine Korrelation zu dem Temperaturverlauf der ETK angesetzt ($r=0,0$), weil die Anlagen im allgemeinen nicht für unterschiedliche Brandeinwirkungsdauern bemessen werden. Natürlich wird in manchen Fällen ein besonderer Schutz der Anlagen vorgesehen, um die Funktionstüchtigkeit zu verlängern. Die Überdimensionierung von Halterungen der Rohrleitungen oder die Isolierung von Rohr- und Kabelleitungen werden durch ihre Auslegungstemperatur berücksichtigt.

Berechnungen haben gezeigt, daß nur wenige Kurven nötig sind, um die erforderlichen Daten für das Modell und damit für die Systemanalyse zu gewinnen. Durch die bezogene Zeitdarstellung wird eine Unabhängigkeit von der Ansprech- bzw. Versagenstemperatur erreicht. Als nächster Schritt wird auch der Sicherheitsindex β in einer bezogenen Form dargestellt. Dazu wird der berechnete Sicherheitsindex β mit dem Variationskoeffizienten des Widerstandes multipliziert. Es zeigt sich, daß sich die Kurven bei gleichen Fraktilwerten mit zunehmendem Variationskoeffizienten sehr schnell einer Grenzkurve nähern. In Bild 4.4 sind diese Kurven für ausgewählte Variationskoeffizienten und einem festgelegten Fraktilwert von 15,87 % dar-

gestellt. Dieser Fraktilwert entspricht bei der Standardnormalverteilung der Wahrscheinlichkeit an der Stelle $z=1,0$.

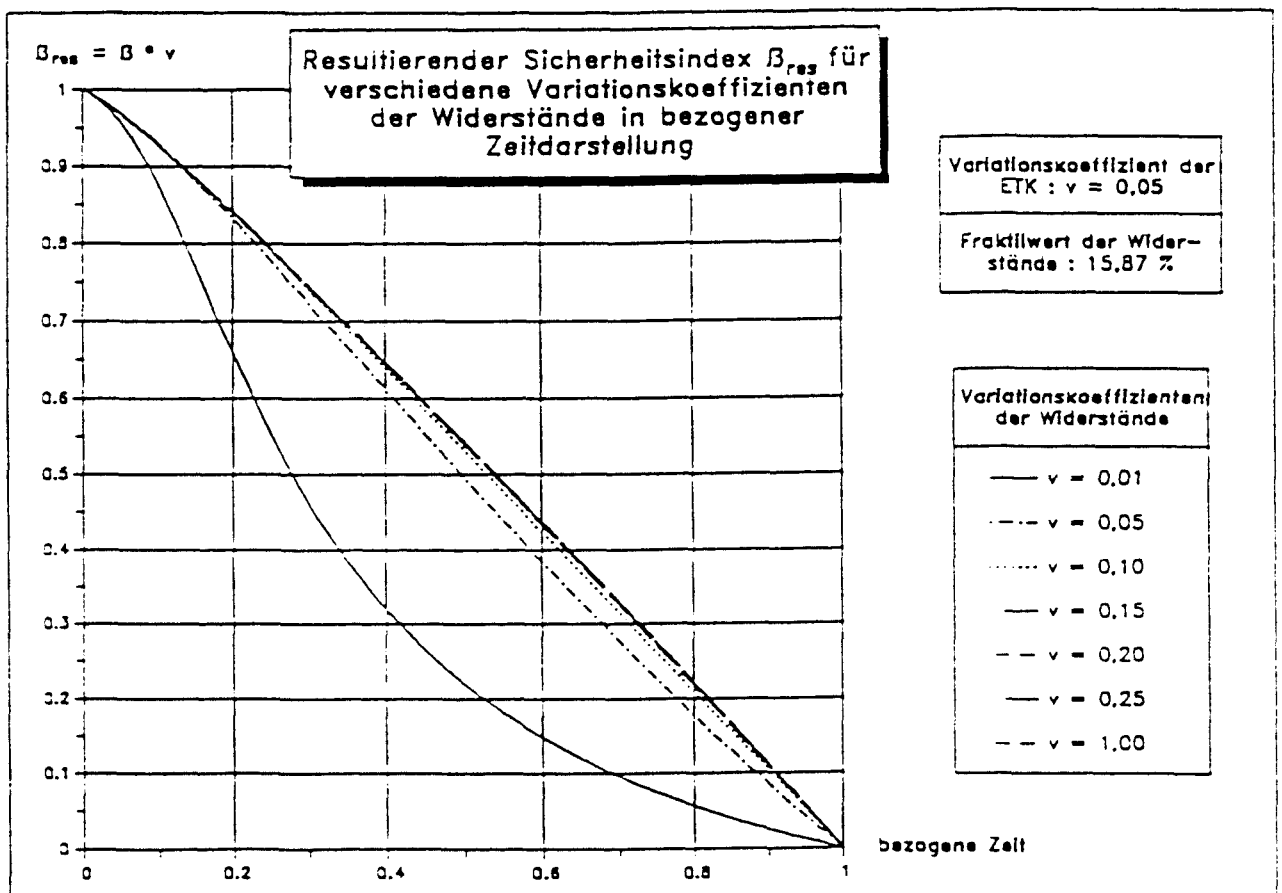


Bild 4.4 Resultierender Sicherheitsindex β_{res} beliebiger anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen für eine 15,87 %-Fraktile

Für sehr kleine Variationskoeffizienten der Widerstände ($V=0,01$) ergeben sich erhebliche Abweichungen, die jedoch sehr

schnell gegen eine Grenzkurve für den fiktiven Variationskoeffizienten $V=1,00$ konvergieren. Variationskoeffizienten kleiner $V=0,05$ werden für anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.2: min $V=0,10$). Die Grenzkurve für den Variationskoeffizienten $V=1,00$ wird daher als Bezugskurve gewählt. Sollten Untersuchungen an einzelnen Komponenten (Bsp.: Schmelzlotauslöser) geringere Variationskoeffizienten ergeben, könnten solche Ereignisse wie in Abschnitt 4.2 gesondert betrachtet werden.

Für ausgewählte Fraktilwerte können somit einzelne Kurven dargestellt werden, aus denen der Sicherheitsindex β für Ereignisse mit beliebigem Variationskoeffizienten und beliebiger Versagenstemperatur entnommen werden kann (Bild 4.5). Die Formulierung des Kurvenverlaufs mit Hilfe eines Polynoms 2. Grades (Tabelle 4.4) gelingt auch hier vorzüglich (vgl. Bild A13).

Der Koeffizient "a" des Polynoms (Tabelle 4.4) ist für die untersuchten Fraktilwerte identisch und kann näherungsweise auch auf $a=1,0$ gesetzt werden.

Die Ermittlung zeitvarianter Sicherheitsindices nach Bild 4.5 mit der bisher betrachteten Auslegungstemperatur kann nicht zu sinnvollen Ergebnissen führen, weil das Wärmeaufnahmevermögen der Komponenten nicht berücksichtigt wird. Für anlagentechnische Komponenten würde sich die gleiche Temperaturentwicklung ergeben wie für die Gastemperatur des Brandraumes. Die Gastemperatur steigt jedoch in den ersten Minuten des ETK-Brandes dermaßen schnell an, daß innerhalb kürzester Zeit mit dem Versagen aller Komponenten gerechnet werden müßte. Genau genommen müßte eine Wärmebilanzrechnung durchgeführt werden, um den Temperatur-Zeitverlauf für die Komponente unter Normbrandbedingungen zu erfassen. Diese Vorgehensweise setzt jedoch detaillierte Kenntnisse der spezifischen Temperaturkennwerte (Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeichervermögen, etc.) sowie

Abmessungen und Einbaubedingungen der Komponente voraus. Für ein allgemeingültiges Modell führt dies im Endeffekt zu einer Vielzahl von Diagrammen.

Die von der Brandraumtemperatur abweichende Temperaturentwicklung anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen wird im Modell durch einen Korrekturfaktor simuliert, mit dem die Auslegungstemperatur der Komponente erhöht wird. Diese erhöhte Temperatur wird als "Versagenstemperatur" interpretiert. Physikalisch

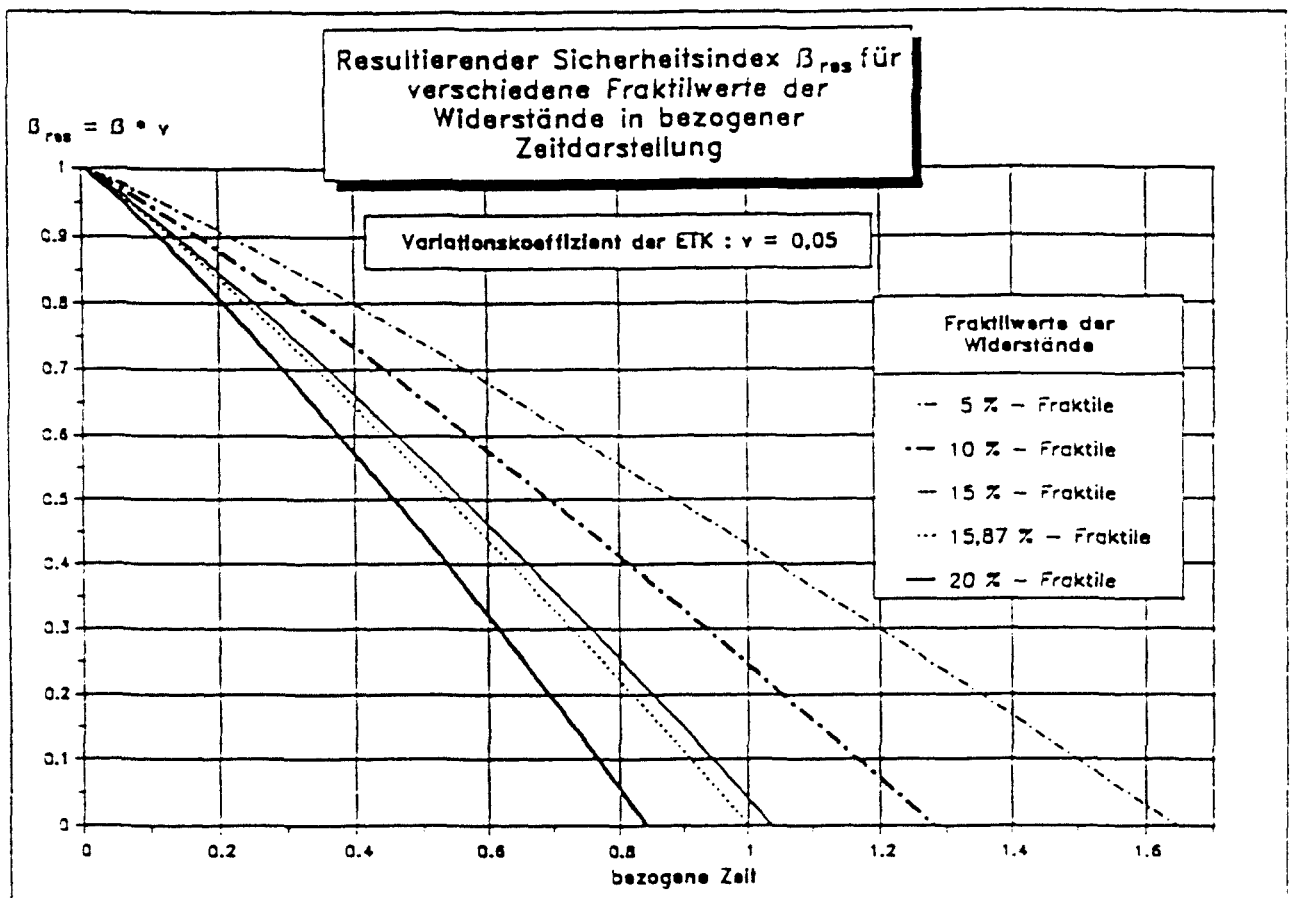


Bild 4.5 Resultierender Sicherheitsindex β_{res} beliebiger anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen

ist diese Vorgehensweise natürlich nicht richtig. Zudem werden die Auslegungs- und die Versagenstemperatur mehr oder weniger im gleichen Temperaturbereich liegen. Denkbar wäre auch eine Abminderung der Einwirkungen, also des Integrals der ETK über die Zeit. In diesem Fall stellt sich jedoch die Frage, um wieviel man dieses Integral abmindern soll. Wählt man verschiedene Abminderungsfaktoren, so erhält man wieder ebensoviele verschiedene Diagramme. Und wie kann man begründen, daß zur Ermittlung der Sicherheitsindices gerade der gewählte Abminderungsfaktor richtig ist ?

Tabelle 4.4 Koeffizienten des Näherungspolynoms für den resultierenden Sicherheitsindex β_{res} von beliebigen anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen

Fraktilwert	a	b	c
5 %	1,015	-0,529	-0,056
10 %	1,016	-0,676	-0,094
15 %	1,016	-0,833	-0,147
15,87 % (z = 1,0)	1,015	-0,873	-0,147
20 %	1,017	-1,023	-0,226

Der Korrekturfaktor z wird empirisch ermittelt, wobei die Änderung des logarithmischen Temperatur-Zeitverlauf der ETK berücksichtigt wird. Damit wird ein Bezug zwischen der Zeit und dem Temperaturaufnahmevermögen der Komponente hergestellt. Als weitere Randbedingung wird festgelegt, daß der Korrekturfaktor stetig abnimmt und bei der Auslegungstemperatur 1100 °C den Wert 1,0 annimmt. Die Berechnung des Korrekturfaktors z erfolgt mit Gleichung 4.12. Der Funktionsverlauf ist aus Bild 4.6 ersichtlich.

$$z = 135,43 \cdot (\vartheta(t)_{\text{ETK}})^{-0,7} \quad (4.12)$$

mit

z - Korrekturfaktor zur Umrechnung der Auslegungs- in die Versagenstemperatur der anlagentechnischen Komponente

$\vartheta(t)_{\text{ETK}}$ - Gastemperatur im Brandraum zum Zeitpunkt t in °C nach Gleichung 4.7.

Durch Multiplikation der Auslegungstemperatur mit dem zugehörigen Korrekturfaktor kann die Versagenstemperatur ermittelt werden (Gl. 4.13). In Bild 4.7 wird das Ergebnis dieser Rechnung dargestellt. Alternativ zum Abgreifen aus Bild 4.7 kann die Versagenstemperatur auch über ein Näherungspolynom 5.Grades (Gl. 4.14) ermittelt werden.

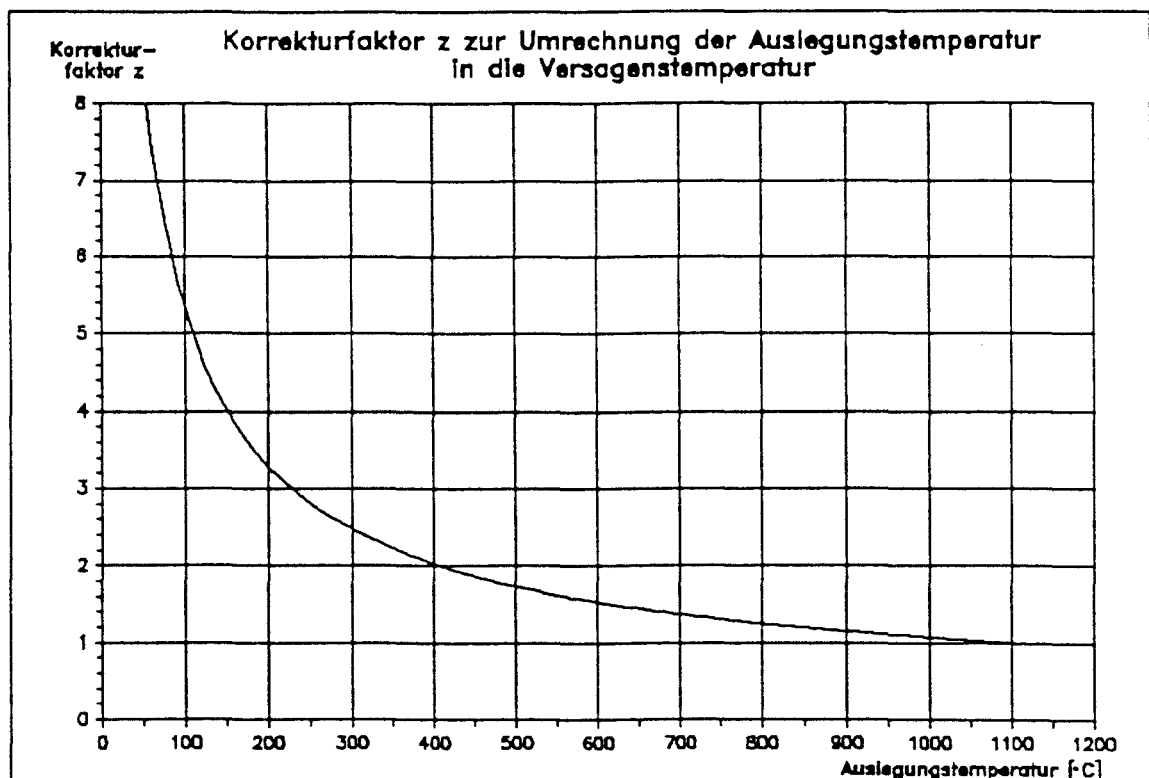


Bild 4.6 Korrekturfaktor z

$$\vartheta_V = z \cdot \vartheta_A \quad (4.13)$$

oder

$$\vartheta_V = 289,6 + 3,1538 \cdot \vartheta_A - 8,7016 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta_A^2 + 1,4234 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_A^3 \quad (4.14)$$

$$- 1,1364 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta_A^4 + 3,4603 \cdot 10^{-12} \cdot \vartheta_A^5$$

mit

- ϑ_V - Versagenstemperatur in °C
- ϑ_A - Auslegungstemperatur in °C
- z - Korrekturfaktor

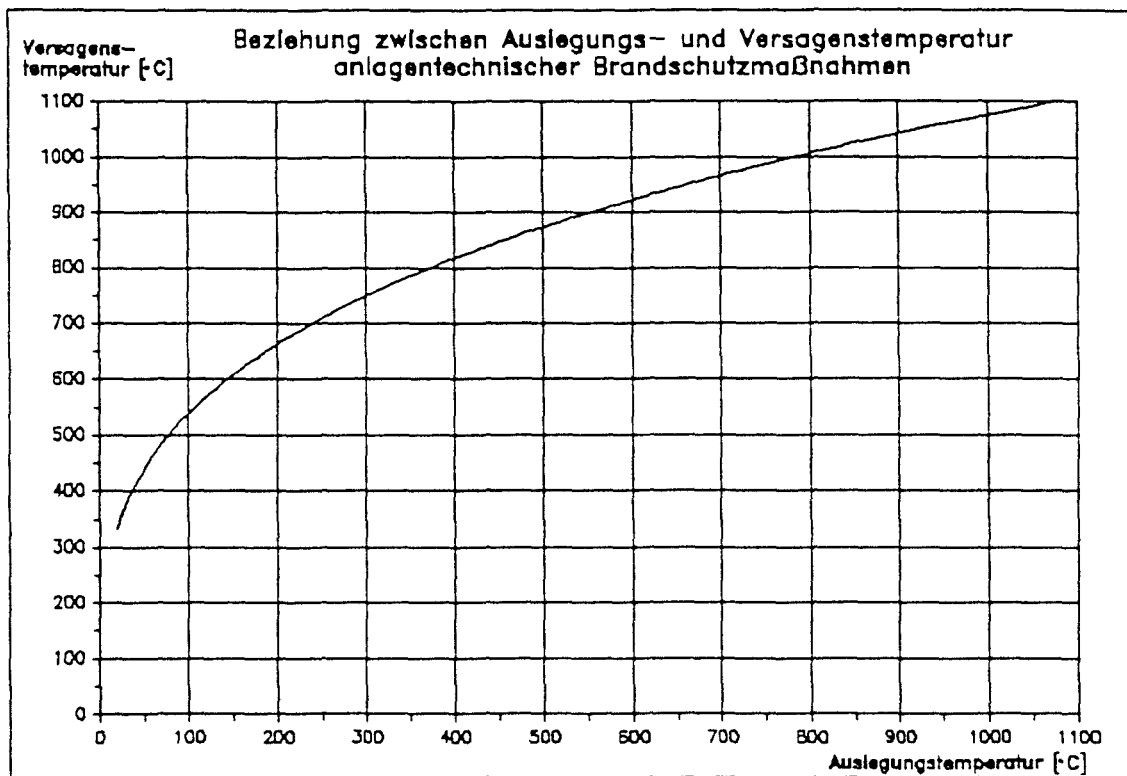


Bild 4.7 Auslegungs- und Versagenstemperatur anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen

Die Ermittlung des zeitvarianten Sicherheitsindex β wird damit wie folgt vorgenommen :

1. Festlegung: Zeitpunktes t^* der Systemanalyse
2. Festlegung: Kennwerte der Komponente
 - a) Auslegungstemperatur in °C
 - b) Fraktile der Auslegungstemperatur in %
 - c) Variationskoeffizient der Auslegungstemperatur
3. Bestimmung: Versagenstemperatur der Komponente Korrekturfaktor z (Gl. 4.12, Gl. 4.13) und Gleichung 4.14 oder Bild 4.7
4. Berechnung: Zeitdauer, nach der die Versagenstemperatur gemäß ETK-Verlauf erreicht wird (Gl. 4.15)

$$t_{\text{ETK}^*} = (10^{(\vartheta - \vartheta_0)/345} - 1) / 8 \quad (4.15)$$

mit

- t_{ETK^*} - Zeitdauer in min, nach der die Versagenstemperatur ϑ_v gemäß ETK erreicht wird
- ϑ - Versagenstemperatur der Komponente in °C
- ϑ_0 - Ausgangstemperatur der Komponente bzw. des Brandraums in °C, (i.a. 20°C)

5. Berechnung: auf die Versagenszeit bezogene Analysezeit

$$t_{\text{bez}} = t^* / t_{\text{ETK}^*} \quad (4.16)$$

mit

- t_{bez} - auf die Versagenszeit bezogene Analysezeit in min
- t_{ETK^*} - Zeitdauer in min, nach der die Versagenstemperatur ϑ_v gemäß ETK-Verlauf erreicht wird
- t^* - Analysezeitpunkt in min

6. Bestimmung: resultierender Sicherheitsindex β_{res} Bild 4.5 oder Tabelle 4.4

7. Berechnung: Sicherheitsindex β (Gl. 4.17) und
ggf. Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit p_f (Bild A10)

$$\beta_B = \beta_{res} / V_B \quad (4.17)$$

mit

- β_B - Sicherheitsindex β der Brandschutzmaßnahme zum Zeitpunkt t^*
- β_{res} - resultierender Sicherheitsindex β_{res} zum Zeitpunkt t^*
- V_B - Variationskoeffizient der anlagentechnischen Brandschutzmaßnahme.

Bei Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Fail Safe-Elementen muß beachtet werden, daß über die Ermittlung der Ansprechwahrscheinlichkeit (vgl. Einführung zu Abschnitt 3.3) hinaus eine weitere Umrechnung erforderlich ist.

Die Kurve für den Sicherheitsindex β nähert sich nach Bild A10 asymptotisch der x-Achse (Versagenswahrscheinlichkeit $p_f = 0,0$). Für die Wahrscheinlichkeit $p = 0,5$ ist der Sicherheitsindex $\beta = 0,0$. Für eine Versagenswahrscheinlichkeit $p_f > 0,5$ müßte danach der Sicherheitsindex β negativ werden. Geht man formal nach dem Additionstheorem der Wahrscheinlichkeitsrechnung vor, das besagt, daß die Summe aus der Eintretens- und der Versagenswahrscheinlichkeit "1" ergibt, so wird man für das Versagen von Sicherheitselementen niemals einen positiven Sicherheitsindex erhalten. Nach Bild 4.5 (bzw. Näherungsformel) und nach Bild A10 wird aus dem berechneten Sicherheitsindex zunächst eine Ansprechwahrscheinlichkeit ermittelt. Diese kann niemals größer als "0,5" werden, weil Bild 4.5 nicht für negative Sicherheitsindizes entwickelt wurde. Die Subtraktion der Ansprechwahrscheinlichkeit von "1" wäre in jedem Fall größer als der Wert 0,5 und hierfür gibt es nach Bild A10 keinen Sicherheitsindex. Hier muß also anders vorgegangen werden.

Als Summe, die sich bei Addition von Eintretens- und Versagenswahrscheinlichkeit ergeben muß, wird nicht der Wert "1" sondern der Wert "0,5" festgelegt. Als Erklärung hierfür kann Bild 4.8 für die Standardnormalverteilung herangezogen werden. Die Ansprechwahrscheinlichkeit füllt darin das Integral der Kurve $[x \leq 0 \leq \infty]$. Der Bereich $[0; \infty]$ entspricht der Wahrscheinlichkeit $p = 0,5$. Was in Bild A10 dargestellt wird, entspricht dem Bereich $[-\infty; 0]$. Die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich also aus der Differenz zwischen dem Bereich $[-\infty; 0]$ und dem Bereich $[x; 0]$ (Gl. 4.18).

$$p_f = 0,5 - p_s \quad (4.18)$$

mit

- | | | |
|-------|---|---|
| p_f | - | Versagenswahrscheinlichkeit |
| p_s | - | Ansprech- oder Eintretenswahrscheinlichkeit |

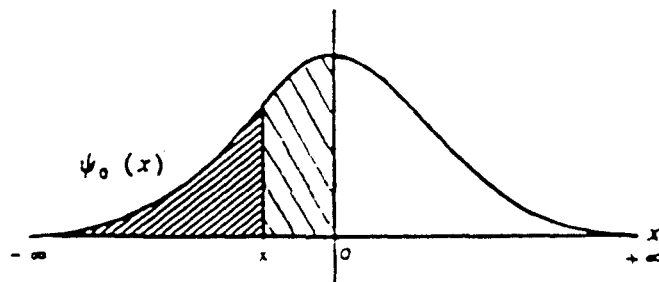


Bild 4.8 Standard-Normalverteilung

Beispiel 1: Sicherheitsindex β für das Versagen einer Komponente

1. Analysezeitpunkt: $t^* = 10 \text{ min}$

2. Funktionselement: elektronischer Schaltschrank
- a) Auslegungstemperatur: 300°C
 - b) Fraktile : 15%
 - c) Variationskoeffizient: 30%
3. Versagenstemperatur: $\vartheta_V = 2,45 \cdot 300 = 735^{\circ}\text{C}$
4. ETK-Zeitdauer: $t_{\text{ETK}^*} = (10^{(735-20)/345} - 1) / 8 = 14,64 \text{ min}$
5. bezogene Zeit: $t_{\text{bez}} = 10 / 14,64 = 0,683$
6. resultierender Sicherheitsindex β_{res} :
- a) aus Bild 4.5 : $\beta_{\text{res}} = 0,38$
 - b) aus Näherungsformel (Gl. 4.11, Tabelle 4.4) :
 $\beta_{\text{res}} = 1,016 - 0,833 \cdot 0,683 - 0,147 \cdot 0,683^2 = 0,379$
7. Sicherheitsindex β und Versagenswahrscheinlichkeit p_f
- a) Sicherheitsindex β : $\beta = 0,379 / 0,30 = 1,26$
 - b) Versagenswahrscheinlichkeit p_f (Bild A10) : $p_f = 0,1.$

Beispiel 2: Sicherheitsindex β für das Ansprechen einer Komponente

1. Analysezeitpunkt: $t^* = 3 \text{ min}$
2. Funktionselement: Schmelzlotauslöser
- a) Auslegungstemperatur: 92°C
 - b) Fraktile: 5%
 - c) Variationskoeffizient: 10%

(Die Temperaturentwicklung bei Schmelzlotauslösern ist von dem Ort der Anbringung abhängig. Für größere Luftzirkulation (Abluftkanal) wird ein Variationskoeffizient von 10 % gewählt.)

3. Ansprechtemperatur: $\vartheta_V = 540 \text{ }^\circ\text{C}$

4. ETK-Zeitdauer: $t_{\text{ETK}^*} = (10^{(540-20)/345} - 1) / 8 = 3,894 \text{ min}$

5. bezogene Zeit: $t_{\text{bez}} = 3 / 3,894 = 0,770$

6. resultierender Sicherheitsindex β_{res} : $\beta_{\text{res}} = 0,575$

7. Sicherheitsindices β für Ansprechwahrscheinlichkeit p_s und Versagenswahrscheinlichkeit p_f

a) Sicherheitsindex β : $\beta = 0,575 / 0,10 = 5,75$

b) Ansprechwahrscheinlichkeit p_s (Bild A10): $p_s = 3 \cdot 10^{-9}$

c) Versagenswahrscheinlichkeit p_f : $p_f = 0,5 - p_s \approx 0,5$

d) Sicherheitsindex β für das Versagen (Bild A10): $\beta = 0$.

Für den Analysezeitpunkt $t=6 \text{ min}$ ergeben sich bei Schmelzlotauslösern folgende Werte:

$$t_{\text{bez}} = 6 / 3,894 = 1,541$$

$$\beta_{\text{res}} = 0,075$$

$$\text{Sicherheitsindex } \beta: \beta = 0,075 / 0,10 = 0,75$$

$$\text{Ansprechwahrscheinlichkeit } p_s \text{ (Bild A10): } p_s = 0,22$$

$$\text{Versagenswahrscheinlichkeit } p_f: p_f = 0,5 - 0,22 = 0,28$$

$$\text{Sicherheitsindex } \beta \text{ für das Versagen (Bild A10): } \beta = 0,6.$$

Für den Analysezeitpunkt $t=6,5$ min würde sich bereits ein negativer Sicherheitsindex β ergeben. Der Schmelzlotauslöser am Abluftkanal muß zu diesem Zeitpunkt als "ausgefallen" bewertet werden; er hat bereits angesprochen!

Aus der Analyse des Schmelzlotauslösers kann gefolgert werden, daß die Wahrscheinlichkeit zwischen dem Versagen und dem Ansprechen dieser Brandschutzmaßnahme in zeitlich sehr engen Grenzen liegt. Maßgebend für die Größe dieser Grenzen wird nicht die Wahl des Variationskoeffizienten sein, obwohl dieser Wert im betrachteten Beispiel den resultierenden Sicherheitsindex um den Faktor 10 erhöht. Vielmehr wird die Ansprechwahrscheinlichkeit von der geringen Auslegungstemperatur beeinflusst. Auf die Ermittlung der auf die Einheits-Temperaturzeitkurve bezogenen Versagenszeit t_{ETK*} muß daher besonderer Wert gelegt werden.

4.4 Temperaturbedingtes Versagen aktiver Brandschutzmaßnahmen

In den acht vorgestellten Teilsystemen wurde das Versagen infolge Ausfall von Elementen und Komponenten dieser Teilsysteme beschrieben (Abschnitt 3). Mit Ausnahme der Teilsysteme "Brandmeldung", "Rauch- und Wärmeabzugsanlagen", "Raumabschluß" und "Brandabschnittsbegrenzung", die nur sekundäre Bedeutung besitzen, wird das Maß der Brandausbreitung die aktiven Brandschutzmaßnahmen in ihrer Funktionsfähigkeit beeinflussen.

Die Ausbreitung eines Brandes kann nur durch eine Brandbekämpfung kontrolliert begrenzt werden. Passive Brandschutzmaßnahmen wie feuerwiderstandsfähige Trennwände können den Feuerdurchtritt nur eine begrenzte Zeit verhindern. Für die Brandbekämpfung gilt, daß nach unbeschränkter Zeit jeder Brand zu löschen ist. Dabei kommt natürlich auch das selbständige Erlöschen des Brandes in Betracht, wenn das brennbare Material verbraucht ist. Eine Brandbekämpfung wird durch Selbsthilfe-

kräfte, Löschhilfeanlagen, die betriebliche oder die öffentliche Feuerwehr vorgenommen. Je früher ein erfolgversprechender Löschangriff vorgenommen wird, desto geringer werden die Brandausbreitung und damit die Schäden im und am Gebäude sein.

Das Versagen einer bestimmten Brandbekämpfungsmaßnahme tritt ein, wenn vorgegebene Grenzen der Ausbreitung überschritten werden. Dazu ist die genaue Kenntnis der Brandentwicklung erforderlich. Die Kubatur des Brandraumes, die Menge, Art und Verteilung der Brandlasten, die Ventilationsverhältnisse, der Einsatz aktiver Brandschutzmaßnahmen und die Feuerwiderstandsfähigkeit der Konstruktion sind nur die Hauptfaktoren, die Einfluß auf die Brandentwicklung haben. Ein allgemeingültiges Modell zu entwickeln, welches all diese Faktoren berücksichtigt und eine relativ exakte Aussage über die vom Brand erfaßte Fläche liefert, ist unmöglich. Im Endeffekt wäre auch dazu eine Systemanalyse nötig, die von Eintretens- oder Versagenswahrscheinlichkeiten ausgehen muß.

Ein Schätzwert für die Brandausdehnung in Abhängigkeit von der Zeit läßt sich jedoch durch einfache Ansätze ermitteln. Um für die Systemanalyse einen hinreichend genauen Wert zu bekommen, wird von folgenden Überlegungen ausgegangen :

1. Nach DIN 18232, Teil 2 werden für die Dimensionierung von Rauchabzugsanlagen drei Bemessungsgruppen definiert, denen je eine Brandausbreitungsgeschwindigkeit zugeordnet wird. Die zugrundegelegten Zahlenwerte sind in DIN 18232 nicht enthalten, sie lauten: 1,8 , 2,7 , und 3,6 m²/min. Danach ergibt sich nach 120 Minuten Branddauer bei hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit eine Brandfläche von $120 \cdot 3,6 = 432 \text{ m}^2$. Für den Industriebau scheint diese Fläche viel zu gering zu sein, zumal Rauch- und Wärmeabzugsanlagen hauptsächlich für die Zeit vor dem flash-over dimensioniert werden.
2. Andere Modelle gehen von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1,0 m/min aus. Eine Brandfläche von 1,0 m² dient als

Zündquelle. Der Feuerübersprung hat bereits stattgefunden. Die Brandausbreitung erfolgt orthogonal zu den Kanten der quadratischen Zündquelle. Nach 120 Minuten ergibt sich eine Brandfläche von $241 \cdot 241 \approx 58000 \text{ m}^2$. Diese Fläche ist als Geschoßfläche für Industriebauten eher selten anzutreffen. Außerdem werden die bereits erwähnten Einflüsse wie Kubatur des Gebäudes (Abweichung von der quadratischen Grundfläche, Hindernisse wie Brandwände), die Verteilung der Brandlasten (Gänge, die das Feuer erst überspringen muß) sowie die Reduzierung der Brandbelastungen für großflächige Industriehallen in diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

Der Ansatz einer in allen Richtungen gleichen Ausbreitungsgeschwindigkeit scheint aber für die Systemanalyse geeignet zu sein. Der Brand wird mit zunehmender Zeit eine immer größere Fläche pro Zeiteinheit erfassen. Nach dem flash-over wird von einer punktförmigen Zündquelle beginnend mit einer kreisförmigen Brandausbreitung gerechnet. Bereits ausgebrannte Teilflächen werden nicht berücksichtigt. Die Brandfläche läßt sich mit Gleichung 4.19 bestimmen.

$$A_{b,t} = (t \cdot v)^2 \cdot \pi \quad (4.19)$$

mit

$A_{b,t}$:	Brandausbreitungsfläche zum Zeitpunkt t nach dem flash-over in m^2
t	:	Zeit nach dem flash-over in min
v	:	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min.

Ähnlich dem Vorschlag in DIN 18232 werden verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten definiert, die für den erwarteten Brandverlauf benutzt werden können. Bild 4.9 gibt die Funktionsverläufe wieder. Es werden gewählt:

- sehr geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit	:	0,1 m/min
- geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit	:	0,3 m/min
- mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit	:	0,5 m/min
- große Ausbreitungsgeschwindigkeit	:	0,7 m/min.

Für die ersten Minuten nach dem flash-over sind aus dieser Darstellung kaum brauchbare Werte zu entnehmen. Daher ist Bild 4.9 für den Bereich [0 ; 30 min] im Anhang noch einmal vergrößert dargestellt (Bild A14).

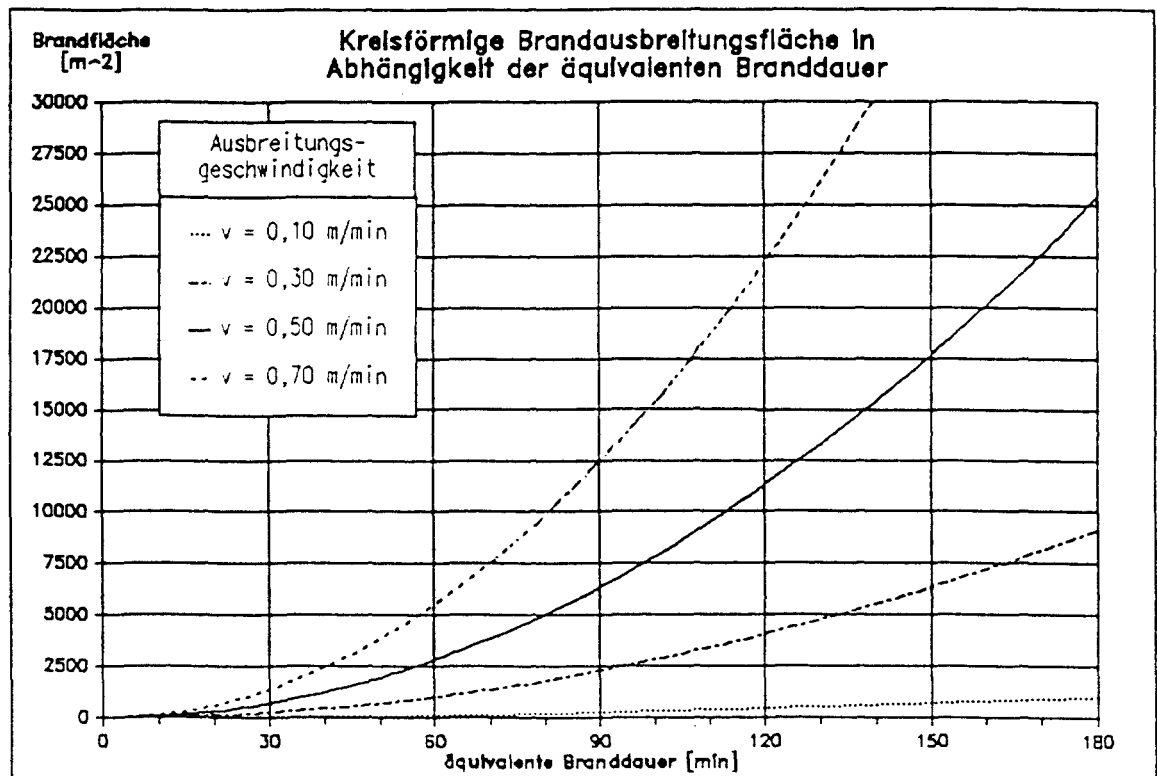


Bild 4.9 Brandausbreitungsfläche in Abhängigkeit der äquivalenten Branddauer

Aus dem Einsatzzeitpunkt der einzelnen Brandbekämpfungsmaßnahmen kann die Brandausbreitung für die geschätzte Ausbreitungsgeschwindigkeit zum Angriffszeitpunkt ermittelt werden. Die Wirkung zuvor ergriffener Brandbekämpfungsmaßnahmen wird nicht angerechnet. Der Einsatzzeitpunkt einer Löschmaßnahme entspricht einer äquivalenten Branddauer, der die Bauteile ausgesetzt sind. Erfolgt der Einsatz zu einem frühen Zeitpunkt,

wird die Brandbeanspruchung der Bauteile wirkungsvoll reduziert. Das Versagen der Bauteile kann entsprechend verhindert werden.

Zur Festlegung der Versagensgrenzen wird nicht von der Zeit ausgegangen, zu dem der Einsatz einer Löschmaßnahme erfolgt, sondern von der bereits vom Brand erfaßten Fläche. Aufschlußreiche Hinweise zur Festlegung der Flächen konnten /24/ und /27/ entnommen werden. Die Versagensgrenzen der aktiven Brandschutzmaßnahmen sind im folgenden wiedergegeben :

- Versagen der Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal mit nicht mehr als einem Kleinlöschgerät, D-Rohr oder C-Rohr /27/ :

Handfeuerlöscher:	Brandausbreitung > 2 m ²
D-Rohr (Wandhydrant):	Brandausbreitung > 20,0 m ²
C-Rohr (Wandhydrant):	Brandausbreitung > 40,0 m ²

- Versagen der Brandbekämpfung durch die betriebliche Feuerwehr:

Betriebsfeuerwehr:	Brandausbreitung > 200 m ²
Werkfeuerwehr:	Brandausbreitung > 400 m ²

- Versagen der Brandbekämpfung durch Löschhilfeanlagen:

Sprinkleranlagen:	Brandausbreitung > 300 m ²
Sprühwasserlöschanlagen:	Brandausbreitung > 600 m ²
CO ₂ -Löschanlagen:	Brandausbreitung > 1000 m ²

- Versagen der Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr:

Brandausbreitung > 2000 m².

Das Versagen der Erstbrandbekämpfung durch Betriebspersonal mit Kleinlöschgeräten wird maßgebend von der möglichen Einsatzdauer vorhandener Kleinlöschgeräte wie Handfeuerlöscher beeinflußt. Ein großflächiger Brand wird damit nicht bekämpft

werden können. Diese Tatsache ändert sich auch nicht, wenn mehrere Kleinlöschgeräte eingesetzt werden.

Die durchschnittlich mit einem C-Rohr abgelöschte Brandfläche beträgt nach /24/ 141 m². Als Kleinst- und Größtwert werden in der Untersuchung 57 m² bzw. 394 m² angegeben. Die Abhängigkeit von der Art, Menge und Verteilung der Brandlast ist unzweifelhaft gegeben. Die Unerfahrenheit des Betriebspersonals in der Brandbekämpfung erfordert eine weitere Abminderung. Daher wird als Versagensgrenze für die Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal mit nicht mehr als einem C-Rohr eine Fläche von 40 m² definiert. Für die Brandbekämpfung mit einem D-Rohr wird diese Fläche noch einmal halbiert.

Das Versagen der Brandbekämpfung durch Feuerwehren betrieblicher oder öffentlicher Art muß in besonderem Maße folgende Punkte berücksichtigen :

- Einsatzstärke und Ausrüstung,
- Löschwasserversorgung,
- Art, Menge und Verteilung der Brandlast.

Im Kapitel 2.7 und Kapitel 2.8 wurden bereits die Einsatzstärken erwähnt, von denen in diesem Modell ausgegangen wird. Geht man von einer verfügbaren Löschwasserversorgung von 4800 l/min aus (Löschhilfeanlagen benötigen eigene Versorgung), reduziert sich das Problem weitgehend auf die Brandlast. In /24/ wird eine Ermittlung der von der Feuerwehr kontrollierbaren Löschräume eingeschossiger Industriehallen in Abhängigkeit der vorgenannten Faktoren angegeben. Der Einfluß baulicher und betrieblicher Gegebenheiten, sowie des Wetters und des Anstellwinkels der Strahlrohre wird in gesonderten Tabellen berücksichtigt. Dieser Einfluß wirkt sich vernachlässigbar gering auf die Löschräume aus und wird daher nicht weiter berücksichtigt. Geht man von einer mittleren Brandbelastung aus (Brandschutzklasse III nach DIN 18230), ergeben sich nach /24/

in Abhängigkeit einsetzbarer Rohre näherungsweise folgende Löschflächen:

Tabelle 4.5 Löschflächen in Abhängigkeit der Mittel betrieblicher und öffentlicher Feuerwehren

Feuerwehrart	maximale Mittel	Brandfläche in m ² *)
Betriebsfeuerwehr	1 TSF = Staffelbesetzung max. 1 B- und 1 C-Rohr	-
anerkannte Werkfeuerwehr	1 LF 8 = Gruppenbesetzung max. 1 B- und 2 C-Rohre	748 (BK IV)
öffentliche Feuerwehr	durch Nachbarschaftshilfe unbegrenzte Stärke	
	max. 10 C-Rohre und 1 Wasserwerfer	3224 (BK III)
	oder 1 Wasserwerfer, 1 B-Rohr und 8 C-Rohre	1927 (BK V)
	oder 12 C-Rohre	1539 (BK V, 3200 l/min)

*) Die Tabellen in /24/ sind für geringe Anzahlen eingesetzter Löschereinheiten leider sehr unvollständig. Daher sind dies nur Näherungswerte, die anhand der verfügbaren Tabellen geschätzt wurden.

Aus Tabelle 4.5 ist zu entnehmen, daß die kontrollierbaren Löschflächen stark von der Brandschutzklasse und den einsetzbaren Löschkräften abhängen. Die Größenordnung der für die Systemanalyse definierten Versagensgrenzen liegen jedoch im Rahmen der nach /24/ angegebenen Flächen. Erwähnenswert scheint hier noch der Hinweis, daß die Ermittlung nach /24/ von eingeschossigen Hallen ausgeht, während dem Modell keine Geschoßzahl zugeordnet wird. Eine Reduktion der Löschflächen scheint daher gerechtfertigt zu sein.

Wie Vergleichsrechnungen mit FORM gezeigt haben, kann für die vier vorgegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten je eine Kurve ermittelt werden, aus der bei gegebener Versagensgrenze und deren Variationskoeffizienten die Ermittlung der zeitvarianten Sicherheitsindices bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgen

kann. Damit ist es möglich, unabhängig von den in diesem Modell betrachteten Versagensgrenzen, andere Grenzen zu definieren, die zudem beliebige Streuungen aufweisen können. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit $v=0,10$ m/min sind Ergebnisse dieser Vergleichsrechnungen im Anhang in Bild A15 dargestellt.

Der Eingangswert k wird nach Gleichung 4.20 berechnet. Den Sicherheitsindex β erhält man durch Umrechnung des resultierenden Widerstandes β_{res} mit Gleichung 4.21. Die Ergebnisse sind in Bild 4.10 dargestellt.

$$k = t^* / \sqrt{A} \quad (4.20)$$

$$\beta = \beta_{res} / V \quad (4.21)$$

mit

k	-	Eingangswert k in min/m
t^*	-	Betrachtungszeitpunkt t in min
A	-	Versagensgrenze (-fläche) des Ereignisses in m^2
β	-	Sicherheitsindex β
β_{res}	-	resultierender Sicherheitsindex
V	-	Variationskoeffizient der Versagensgrenze.

Für die Rechnungen wurde als Widerstand eine beliebige Versagensfläche festgelegt. Die Einwirkung wurde für jeden Zeitschritt mit gegebener Ausbreitungsgeschwindigkeit aus Gleichung 4.19 berechnet und in der Grenzfunktion dem konstanten Widerstand gegenübergestellt. Eine Korrelation zwischen Einwirkung und Widerstand wurde nicht berücksichtigt. Als Verteilungsfunktionen wurde die Normalverteilung gewählt. Der Variationskoeffizient der Einwirkung wurde mit $V=0,05$ festgelegt. Die Kurven lassen sich ebenso wie in den vorangegangenen Abschnitten mit einem Polynom 2.Grades beschreiben. Die Koeffizienten enthält Tabelle 4.6.

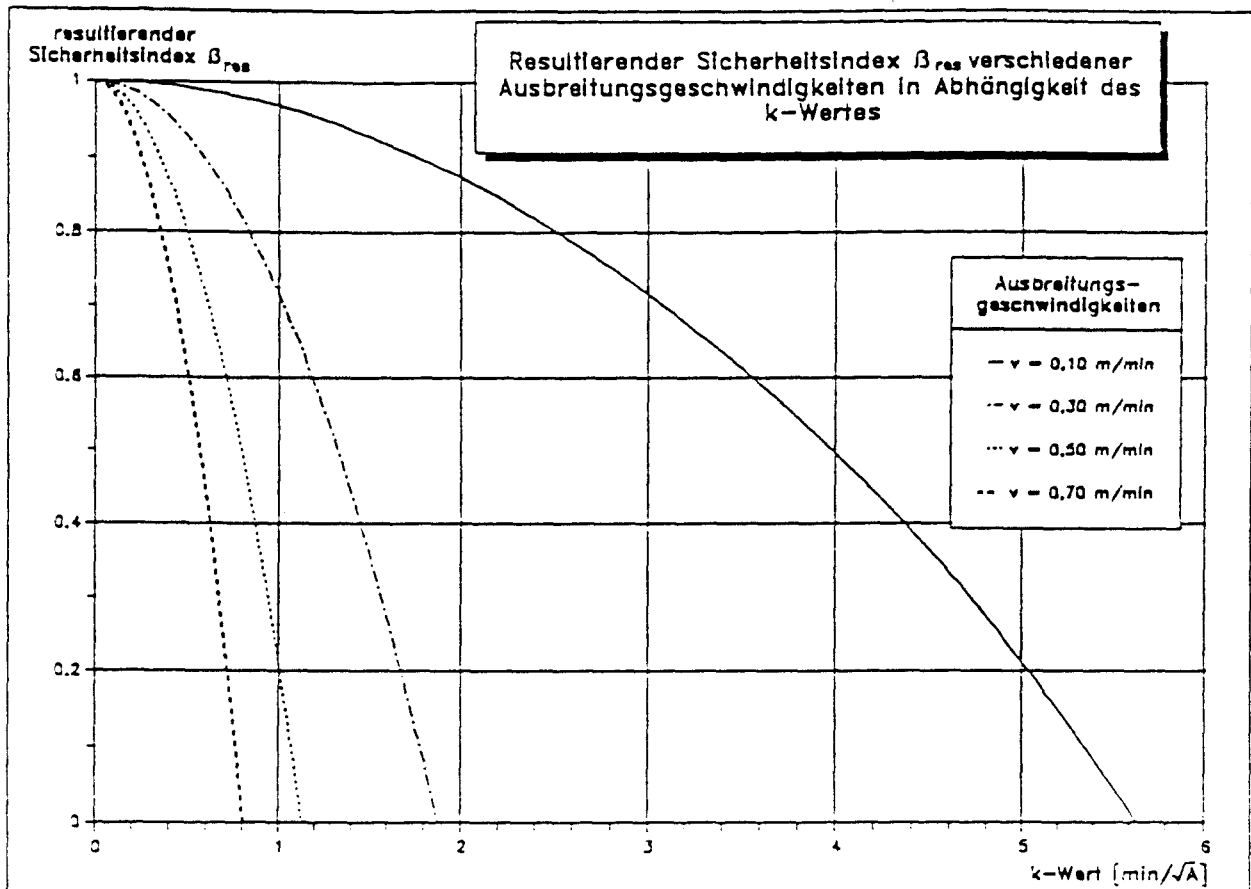


Bild 4.10 Resultierender Sicherheitsindex β_{res} der vier Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Der Koeffizient "a" des Näherungspolynoms ist in allen vier Fällen identisch 1,0. Der Koeffizienten "b" weist betragsmäßig 1/100 der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf.

Tabelle 4.6 Koeffizienten des Näherungspolynoms für den resultierenden Sicherheitsindex β_{res} der vier Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Ausbreitungsgeschwindigkeit	a	b	c
v = 0,10 m/min	1,0	-0,001	-0,031
v = 0,30 m/min	1,0	-0,003	-0,282
v = 0,50 m/min	1,0	-0,005	-0,783
v = 0,70 m/min	1,0	-0,007	-1,534

Beispiel:

1. Analysezeitpunkt: $t = 30 \text{ min}$
2. Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes: $v = 0,30 \text{ m/min}$
3. Ereignis: Versagen der Brandbekämpfung durch Sprinkleranlagen
infolge zu großer Brandausbreitung
Versagensgrenze: $A = 300 \text{ m}^2$
Variationskoeffizient: $V = 0,25$
4. Berechnung des k-Wertes (Gl. 4.20): $k = 30 / \sqrt{300} = 1,732$
5. Bestimmung des resultierenden Sicherheitsindex β_{res} (Gl. 4.11 und Tabelle 4.6 oder Bild 4.10):
$$\beta_{res} = 1 - 0,003 \cdot 1,732 - 0,282 \cdot 1,732^2 = 0,149$$
6. Berechnung des Sicherheitsindex β (Gl. 4.21):
$$\beta = 0,149 / 0,25 = 0,595$$
7. Versagenswahrscheinlichkeit p_f aus Bild A10:
$$p_f = 0,28$$

4.5 Übergang von der ETK zum Temperatur-Zeitverlauf des Naturbrandes

Die bisherigen Betrachtungen zur Ermittlung zeitvarianter Versagenswahrscheinlichkeiten gingen immer von einem definierten Temperatur-Zeitverlauf aus. Für die Untersuchung brandspezifischer Ereignisabläufe ist jedoch die Kenntnis der "real" erwarteten Temperatureinwirkungen auf die aktiven und passiven Brandschutzmaßnahmen erforderlich.

Der Übergang von der Einheits-Temperaturzeitkurve zum Naturbrand kann nur eine grobe Abschätzung des erwarteten Brandverlaufs darstellen. Die wahren Temperaturen im Brandraum werden bei einem realen Brand erst durch das Ausmaß der Schäden an den Bauteilen nach dem Brand abschätzbar. In den oft zitierten Lehrter Brandversuchen konnte beispielsweise die Temperaturentwicklung im Brandraum und an den Bauteilen unter definierten Verhältnissen (Brandlast, Lüftung, Zündquelle, Ort der Zündquelle, Lage des Bauteils, etc.) erforscht werden.

Die ETK stellt letzten Endes eine mathematische Formulierung von ausgewählten Brandversuchen dar, die für einen Brand im Bereich des Wohnungsbaus als obere Grenzkurve angesehen werden kann. Im Industriebau ist die Abschätzung der Temperaturentwicklung um so schwerer, weil die Größe des Brandraums, die möglichen Ventilationsverhältnisse sowie Menge, Art und Verteilung der Brandlast weitaus größeren Streuungen unterworfen sind.

Die Berechnung von Temperatur-Zeitverläufen mit Hilfe von Wärmebilanzmodellen funktioniert vorwiegend für kleinere Brandräume. Bei großen Räumen ist die Erfassung und Formulierung der Eingangsdaten für die Berechnung mit Unsicherheiten verbunden, die im Industriebau nur lokal den erwarteten Temperaturverlauf an einen tatsächlichen annähern.

Für die Systemanalyse genügt es, im Brandraum unter zunehmender Temperaturentwicklung die Ermittlung des schwächsten Gliedes der Brandschutzmaßnahmen vorzunehmen. Daraus können Vorschläge zur Verbesserung von Einzelmaßnahmen entwickelt werden, wodurch das Risiko der Brandausbreitung über ein definiertes Maß hinaus begrenzt werden kann. Die Berücksichtigung eines abnehmenden Temperaturverlaufs ist hierfür vorerst nicht nötig.

Zur Ermittlung zeitvarianter Sicherheitsindices bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten für Ereignisse, die einem Temperatur-Zeitverlauf ausgesetzt sind, der nicht dem der ETK entspricht, wird ein Vergleich der freigesetzten "Wärmeenergie" des erwarteten Brandverlaufs mit dem der ETK vorgeschlagen. Die Gründe dafür sind folgende:

1. Bis auf die Brandausbreitung gehen sämtliche Ermittlungen von zeitvarianten Sicherheitsindices bei den Einwirkungen vom Integral der ETK über die Zeit aus.
2. Die ETK ist die einzige in der Bundesrepublik Deutschland genormte Kurve eines Brandverlaufs.
3. Bauteile werden nach dem in DIN 4102 genormten Temperatur-Zeitverlauf geprüft und in Feuerwiderstandsklassen eingeteilt.

Der erwartete Temperatur-Zeitverlauf wird im allgemeinen gut mit einer trilinearen Funktion der Form

$$\vartheta(t^*) = \vartheta_0 + a \cdot t^* \text{ für } t^* \leq t_1 \quad (4.22)$$

bzw.

$$\vartheta(t^*) = \vartheta_0 + a \cdot t_1 + b \cdot t^* \text{ für } t_1 \leq t^* \leq t_2 \quad (4.23)$$

bzw.

$$\vartheta(t^*) = \vartheta_0 + a \cdot t_1 + b \cdot t_2 + c \cdot t^* \text{ für } t^* > t_2 \quad (4.24)$$

mit

- $\vartheta(t^*)$ - Temperatur im Naturbrand zum Zeitpunkt t^* in °C
- a, b, c - Koeffizienten der trilinearen Näherung des Naturbrandes
- t_1, t_2 - Übergangszeitpunkt von der ersten (zweiten) zur zweiten (dritten) linearen Näherung des Naturbrandes in min
- t^* - Zeitpunkt t^* des betrachteten Temperatur-Zeitverlaufs in min
- ϑ_0 - Ausgangstemperatur in °C

bis zum Erlöschen des Brandes anzunähern sein. Die Temperaturabnahme kann sowohl aus Brandbekämpfungsmaßnahmen wie aus Brennstoff- oder Sauerstoffmangel resultieren.

Aus dem Vergleich der Integrale ("Wärmeenergien") wird eine Zeitdauer ermittelt, die der eines Normbrandes entspricht. Diese Zeitdauer wird analog zur DIN 18230 als äquivalente Branddauer bezeichnet. Die Gleichungen 4.25 bis 4.27 geben die einzelnen Energieanteile der Temperatur-Zeitverläufe wieder.

$$E_{\text{ETK}} = 345/8 \cdot [8 \cdot \log(8 \cdot t_a + 1) \cdot t_a + \log(8 \cdot t_a + 1) - 8 \cdot t_a] + \vartheta_0 \cdot t_a \quad (4.25)$$

und

$$E_{\text{Natur}} = \vartheta_0 \cdot t^* + a \cdot t^{*2} / 2 \quad \text{für } t^* \leq t_1 \quad (4.26)$$

bzw.

$$E_{\text{Natur}} = \vartheta_0 \cdot t^* + 1/2 \cdot [a \cdot t_1^2 + b \cdot (t^* - t_1)^2 + 2 \cdot a \cdot t_1 \cdot (t^* - t_1)] \quad \text{für } t_1 \leq t^* \leq t_2 \quad (4.27)$$

bzw.

$$E_{\text{Natur}} = \vartheta_0 \cdot t^* + 1/2 \cdot [a \cdot t_1^2 + b \cdot (t_2 - t_1)^2 + 2 \cdot [a \cdot t_1 \cdot (t_2 - t_1) + (t^* - t_2) \cdot (a \cdot t_1 + b \cdot t_2)] + c \cdot (t^* - t_2)^2] \quad \text{für } t^* > t_2 \quad (4.28)$$

mit

- | | | |
|--------------------|---|---|
| E_{ETK} | - | Wärmeenergie des Normbrandes in °C·min |
| E_{Natur} | - | Wärmeenergie des Naturbrandes in °C·min |
| t^* | - | Zeitpunkt t^* des betrachteten Temperatur-Zeitverlaufs in min |
| t_a | - | äquivalente Branddauer der Normbrandkurve in min |
| t_1, t_2 | - | Übergangszeitpunkt von der ersten (zweiten) zur zweiten (dritten) linearen Näherung des Naturbrandes in min |
| a, b, c | - | Koeffizienten der trilinearen Näherung des Naturbrandes |
| ϑ_0 | - | Ausgangstemperatur der Temperatur-Zeitkurve in °C. |

Die exakte Auflösung der Gleichung

$$E_{\text{ETK}} = E_{\text{Natur}} \quad (4.29)$$

nach der äquivalenten Branddauer t_a läßt sich nicht mehr mit einfachen Funktionen beschreiben. Hierzu müßte entweder eine Differentialgleichung betrachtet werden oder auf iterativem Wege nach einer Lösung gesucht werden. Alternativ zur exakten Lösung wird folgende Möglichkeit angeboten :

- Die Ermittlung des Integrals des Naturbrandes erfolgt mit Gleichung 4.26 bis 4.28.
- In den Bildern 4.11 und 4.12 wird das ausgewertete Integral der ETK über die Zeit für den Zeitraum $t=0$ bis $t=180$ min grafisch bzw. in Tabelle 4.7 als Koeffizienten eines Polynoms 3.Grades zur Verfügung gestellt.
- Mit dem berechneten Wert des Naturbrand-Integrals kann aus den Bildern 4.11 bzw. 4.12 die äquivalente Normbranddauer t_a direkt abgegriffen werden.

- Aus Gleichung 4.30 kann die äquivalente Normbranddauer t_a ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, daß die Koeffizienten des Näherungspolynoms für die ermittelte äquivalente Normbranddauer t_a richtig gewählt wurden. Für kleine äquivalente Branddauern können sich erhebliche Abweichungen gegenüber dem Näherungspolynom für $t_a > 30$ min ergeben. Die Kontrolle, ob die berechnete äquivalente Branddauer im gewählten Gültigkeitsbereich liegt, sollte daher nicht unterbleiben.

$$t_a = a + b \cdot E_{\text{Natur}} + c \cdot E_{\text{Natur}}^2 + d \cdot E_{\text{Natur}}^3 \quad (4.30)$$

$$t_a : t_a \leq 30 \text{ min} \quad \underline{\text{oder}} \quad 30 \text{ min} < t_a \leq 180 \text{ min.}$$

Die iterative Lösung ist dem Näherungspolynom vorzuziehen, weil die Näherung nicht zu befriedigend genauen Lösungen führt. Abweichungen von ± 5 min sind durchaus möglich.

Tabelle 4.7 Koeffizienten des Näherungspolynoms für das Integral der Einheits-Temperaturzeitkurve über die Zeit

Einheit	Gültigkeitsbereich	a	b	c	d
K · min	$t_a \leq 30 \text{ min}$	0.3622	$1.3273 \cdot 10^{-3}$	$-1.8925 \cdot 10^{-8}$	$2.9197 \cdot 10^{-13}$
	$30 \text{ min} < t_a \leq 180 \text{ min}$	2.0514	$9.8522 \cdot 10^{-4}$	$-1.4511 \cdot 10^{-8}$	$2.8544 \cdot 10^{-15}$
°C · min	$t_a \leq 30 \text{ min}$	0.6190	$1.9971 \cdot 10^{-3}$	$-5.1919 \cdot 10^{-8}$	$1.1546 \cdot 10^{-12}$
	$30 \text{ min} < t_a \leq 180 \text{ min}$	2.9319	$1.3254 \cdot 10^{-3}$	$-3.1106 \cdot 10^{-8}$	$8.0505 \cdot 10^{-15}$

Als Eingangswert zur Ermittlung zeitvarianter Sicherheitsindizes ist in jedem Fall die Kenntnis des Betrachtungszeitpunktes erforderlich. Handelt es sich um den ETK-Brandverlauf, entspricht der Betrachtungszeitpunkt dem Eingangswert. Für einen vom Normbrandverlauf abweichenden Temperatur-Zeitverlauf muß

die äquivalente Branddauer als Eingangswert benutzt werden. Daher muß für jeden Untersuchungszeitpunkt die äquivalente Branddauer berechnet werden, sofern es sich nicht um den Normbrandverlauf handelt.

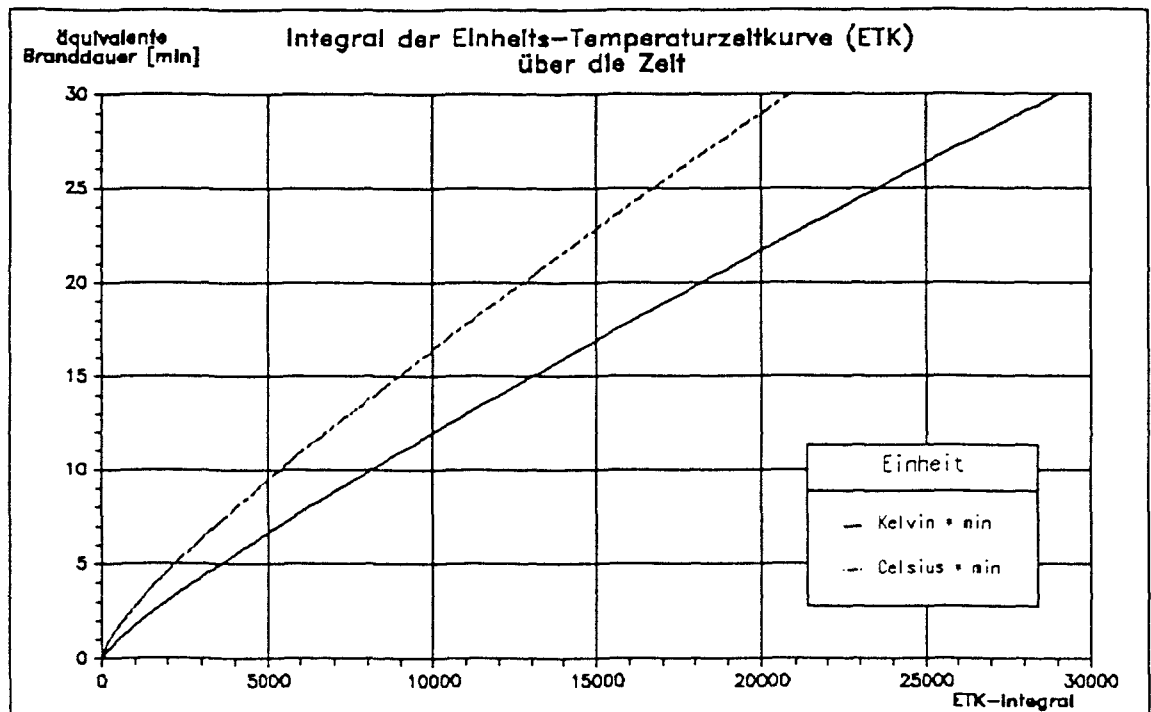


Bild 4.11 Integral der ETK über die Zeit für $t \leq 30$ min

Die Ermittlung eines globalen Korrekturfaktors, der sich aus der Division eines gewählten Betrachtungszeitpunktes durch die zugehörige äquivalente Normbranddauer ergeben würde (die jeweiligen Betrachtungszeitpunkte müßten dann durch den Korrekturfaktor geteilt werden), ist nicht empfehlenswert. Weder der Funktionsverlauf des ETK-Integrals noch das Integral über die Näherungsfunktion des erwarteten Temperatur-Zeitverlaufs stellen lineare Funktionen dar.

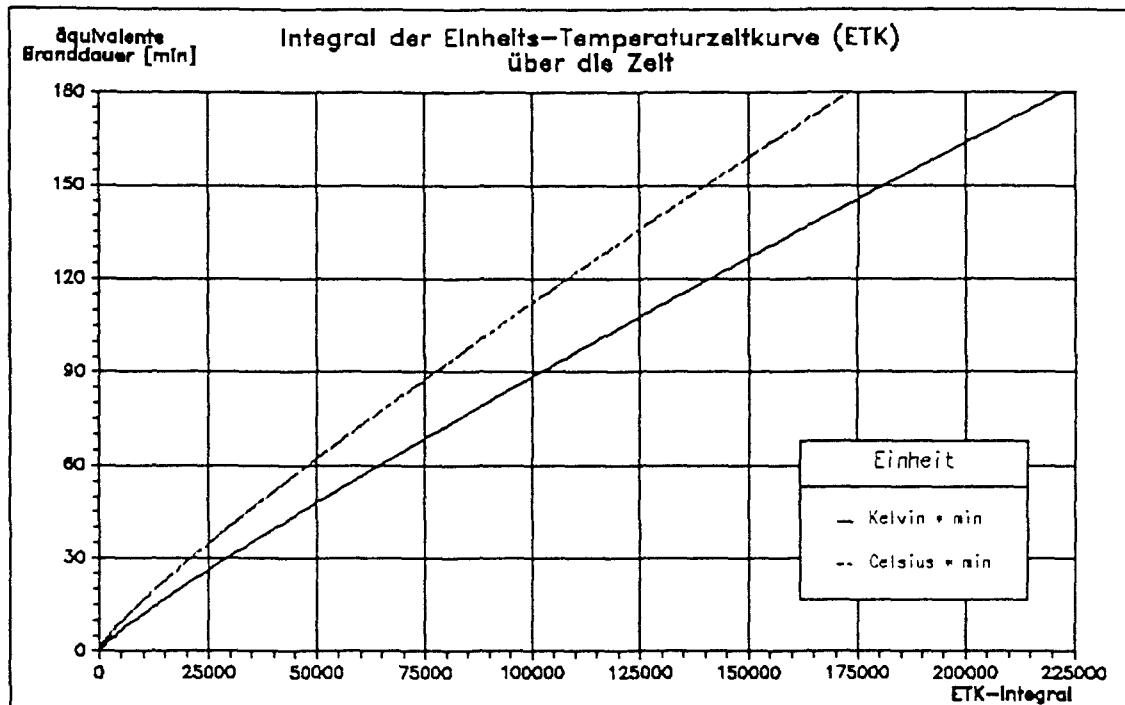


Bild 4.12 Integral der ETK über die Zeit für $t \leq 180$ min

5. EREIGNISABLAUFANALYSE

5.1 Allgemeines

Die Ereignisablaufanalyse wird mit dem Programmsystem SYSREL (System Reliability) /17/ durchgeführt. SYSREL berechnet Systemwahrscheinlichkeiten und gibt bei entsprechender Programmsteuerung zusätzlich Hinweise auf die Empfindlichkeit von Zufallsvariablen und die Bedeutung von Komponenten bzw. Teilsystemen im Gesamtsystem. Die logische Struktur des Systems muß SYSREL entweder als minimale Schnittmenge aller Zufallsvariablen des Gesamtsystems oder als Teilschnittmenge der einzelnen Komponenten des Systems übergeben werden. Die Untersuchung des Gesamtsystems mit all seinen Zufallsvariablen ergibt natürlich die umfangreichsten Ergebnisse.

Die Voraussetzung der minimalen Schnittmengenexistenz wird für gewöhnlich nicht erfüllt und kann für komplexe Systeme per Hand nur mühsam aufbereitet werden. Verschiedene Algorithmen, die diese Aufgabe lösen, stehen dafür bereit. In Verbindung mit dem Programmsystem SYSREL wird zur minimalen Schnittmengenbildung das Programm CUTALG (Cut Algorithm) /17/ bereitgestellt. Es ist in der Lage, die logischen Verknüpfungen des Gesamtsystems, die ihm in Form des klassischen Fehlerbaums zur Verfügung gestellt werden, mit Hilfe eines besonderen Algorithmus aufzulösen und eine minimale Schnittmenge des Systems zu berechnen. Das Ergebnis kann direkt von SYSREL gelesen werden.

CUTALG verarbeitet ausschließlich "UND" und "ODER"-Verknüpfungen. Die speziellen "NICHT" und "K von N"-Verknüpfungen müssen vorher auf die einfachen "UND"- und "ODER"-Verknüpfungen zurückgeführt werden.

Die interaktive Programmversion von SYSREL bedarf dieses Ergebnisses als erstem Eingabedatensatz. Der zweite Eingabedatensatz enthält die Sicherheitsindices aller Zufallsvariablen sowie deren Einflußfaktoren auf andere Komponenten des Systems.

Jedes System kann als eine Kombination von Vereinigungs- und Schnittmengen seiner Ereignisse dargestellt werden. Für SYSREL wird die Kombination von Mengen gesucht, die unter Beachtung, daß keine kombinierte Menge eine andere Schnittmenge als wahre Teilmenge beinhaltet, minimal wird (Gl. 5.1, Schnittmengendarstellung oder Vereinigung von Schnittmengen). Die zweite Darstellungsform heißt Verknüpfungsmenge (hier nicht dargestellt).

$$E = \bigcup_i \bigcap_j E_{ij} \quad (5.1)$$

Die Bildung jeder einzelnen Menge kann durch systematische Anwendung der Distributiv- und Absorptionsgesetze der Mengenalgebra erreicht werden (Gl. 5.2 bis 5.4).

$$E_i \cap (E_j \cup E_k) = (E_i \cap E_j) \cup (E_i \cap E_k) \quad (5.2a)$$

$$E_i \cup (E_j \cap E_k) = (E_i \cup E_j) \cap (E_i \cup E_k) \quad (5.2b)$$

und wenn

$$E_i \subset E_j \quad \text{und} \quad E_k \subset E_j \quad (5.3)$$

dann

$$(E_i \cup E_k) \subset E_j \quad \text{und} \quad (E_i \cap E_k) \subset E_j \quad (5.4)$$

Für reine Parallel- und reine Seriensysteme, deren Komponenten untereinander vollständig abhängig oder vollständig unabhängig sind, kann die Versagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe der klassischen Grenzen angegeben werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit von in Serie geschalteten Parallelsystemen oder parallelen Seriensystemen, deren Komponenten zudem noch untereinander korreliert sind, kann nur durch Angabe oberer und unterer Grenzen abgeschätzt werden.

In SYSREL werden nur Seriensysteme betrachtet. Zur Lösung der sogenannten "Multinormalen Verteilungsfunktion" der Seriensysteme können verschiedene Algorithmen benutzt werden. SYSREL bedient sich einer speziellen Lösung nach Dunnet/Sobel. Wenn alle Ereignisse untereinander korreliert sind, erhält man nach diesem Schema die exakte Lösung für das reine Seriensystem. Andernfalls wird die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems durch die bereits erwähnten Grenzen definiert.

Die Wichtungs- bzw. Einflußfaktoren α_{ik} der einzelnen Zufallsvariablen und Komponenten auf das Gesamtsystem werden nachträglich aus der Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems und den gegebenen Versagenswahrscheinlichkeiten der Zufallsva-

riablen unter Berücksichtigung der Korrelation zu anderen Komponenten ermittelt. Aus den Wichtungsfaktoren kann abgelesen werden, wie stark sich die Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen Variablen auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems ausgewirkt hat. Da die Ergebnisse von SYSREL die Wichtungsfaktoren in normierter Form enthalten, kann der prozentuale Anteil der betreffenden Variablen an der Systemversagenswahrscheinlichkeit direkt berechnet werden.

In SYSREL ist ein Algorithmus implementiert, der die Eingabedaten untersucht und selbsttätig eine Reduktion des Systems vornimmt. Die Sicherheitsindices der Variablen werden dahingehend untersucht, ob nicht auf eine Berücksichtigung der Variablen verzichtet werden kann, wenn ihr Sicherheitsindex bestimmte Grenzen übersteigt, die Versagenswahrscheinlichkeit also so gering ist, daß die Variable keinen Einfluß auf die Systemversagenswahrscheinlichkeit hat. Durch diese Reduktion vermindert sich die Anzahl der Schnittmengen, was in einer kürzeren Rechenzeit resultiert. Ein genauer Grenzwert für dieses Entscheidungskriterium ist nicht bekannt. Aus Rechnungen geht hervor, daß der Wert bei ca. $\beta=2,5$ bis $\beta=4$ liegt.

Probleme können sich bei der Systemanalyse ergeben, wenn sehr kleine oder gar negative Sicherheitsindices eingegeben werden. Das Programm liefert auch für $\beta \leq 0$ noch Ergebnisse, die jedoch nicht mehr vertrauenswürdig sind. Die Reduktion des Systems bewirkt, daß für die vernachlässigten Zufallsvariablen keine Wichtungsfaktoren ausgegeben werden können, weil ihr Einfluß im Rahmen der Genauigkeitsanforderungen von SYSREL nicht meßbar ist.

5.2 Berechnungsbeispiel

5.2.1 Allgemeines

Zur Durchführung der Systemanalyse bedarf die allgemeine Formulierung des Problems "Versagen von Brandschutzmaßnahmen im Anforderungsfall" der Festlegung systemspezifischer Gegebenheiten. Brandschutzmaßnahmen, die von vornherein zum Versagen verurteilt sind, weil ihre Versagenswahrscheinlichkeit pro Anforderung größer als $p_f=0,5$ (Sicherheitsindex $\beta=0$) ist oder weil sie im betrachteten System nicht existieren, werden bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Die Analyse im Zeitschrittverfahren muß auch die Zeitvarianz einiger Brandschutzmaßnahmen berücksichtigen, die sich nicht nur in der veränderlichen Versagenswahrscheinlichkeit dieser Maßnahmen ausdrückt, sondern zudem auch eine Änderung des Systems (Fehlerbaum) in sich birgt (Anzahl der Systemvariablen und/oder Verknüpfungen im System). Der Ausfall einer ganzen Komponente verursacht im Gesamtsystem sowohl eine Änderung der Variablen wie auch eine Änderung der Teilsysteme und damit der "UND"- und "ODER"-Verknüpfungen im System. Manche Teilsysteme treten erst nach einer gewissen Verzögerungszeit in Erscheinung und bewirken somit auch eine Änderung des Systems.

Für umfangreiche Systeme ist die Erstellung eines einzelnen und zudem fehlerfreien (zweiten) Datensatzes per Hand äußerst zeitaufwendig. Soll dieses System zeitabhängigen Änderungen unterworfen werden, wird die Erstellung der Datensätze zur Mühsal. Zur Erzeugung der Datensätze wurde daher ein Fortran-Programm geschrieben. Routinen zur Berechnung der zeitvarianten Sicherheitsindices gemäß Abschnitt 4 wurden implementiert. Die Ausgabe dieses Programms erfüllt die Anforderungen an das Format des zweiten Eingabedatensatzes für die Analyse mit SYSREL. Besondere Verknüpfungen zwischen Basisvariablen mit anderen Komponenten (Teilsystemen), die sich durch die

Einflußfaktoren α_{ik} ausdrücken, werden vom Programm nicht hergestellt und auch im Modell nicht berücksichtigt.

Die Wichtung der Einflußfaktoren α_{ik} einzelner Basisvariablen auf andere Komponenten (Teilsysteme) in Form einer Abminderung in Abhängigkeit der Anzahl anderer Komponenten könnte nach folgendem Schema erfolgen :

$$\text{Bedingung: } \sum \alpha_{ik}^2 = 1 \quad (5.5)$$

Basisvariable hat keinen Einfluß auf andere Komponenten (im Programm implementiert) :

$$\alpha_{ii} = 1,0$$

Basisvariable hat einen Einfluß auf andere Komponenten :

Einfluß der Basisvariablen auf sich selbst :

$$\alpha_{ii} = 0,8$$

Einfluß der Basisvariablen auf andere Komponenten :

$$\alpha_{ik} = \sqrt{((1-0,8^2)/(n-1))} = \sqrt{(0,36/(n-1))} \quad (5.6)$$

mit

- | | | |
|----------------------------|---|--|
| α_{ik}, α_{ii} | - | Einfluß- bzw. Wichtungsfaktor der i-ten Basisvariable auf die k-te (i-te) Komponente |
| n | - | Anzahl der Komponenten, auf die die Basisvariable einen Einfluß ausübt. |

Falls solche Einflüsse berücksichtigt werden sollen, müssen sie per Hand nachgetragen werden. Die möglichen Verknüpfungen sind so vielfältig, daß ihre Berücksichtigung im Programm für beliebige Systemkonstellationen zu einem erheblichen Programmieraufwand führen würde.

Bei Verwendung der zwei Datensatz-Erstellungsprogramme ist äußerste Sorgfalt geboten, wenn das Ergebnis von CUTALG (erster Eingabedatensatz für SYSREL, enthält die minimale Schnittmenge) mit dem Ergebnis des eigenen Programms zusammengebunden wird. Die Reihenfolge der Basisvariablen ist für jeden Zeitschritt peinlichst genau aufeinander abzustimmen.

Einzelne Komponenten der Teilsysteme enthalten Basisvariablen, die in den Tabellen des Abschnitt 3 als Alternative dargestellt wurden. Dort wurde bereits erwähnt, daß das Vorhandensein unterschiedlicher Melder in einem Raum das Versagen durch Nichterreichen der Anregungsschwelle senken kann. Der Sicherheitsindex β darf in diesem Fall erhöht werden. Ebenso können bei der Systemanalyse unterschiedliche Bauteile gleichzeitig berücksichtigt werden. Auf die explizite Darstellung dieser Verzweigungen wurde in den Bildern A1 bis A8 des Anhangs aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Die Bilder A1 bis A8 können als Arbeitsblätter benutzt werden, um die verschiedenen Systemkonstellationen für die einzelnen Zeitstufen übersichtlich darzustellen. Die untersuchten Konstellationen sind im Anhang enthalten (Bilder A18 bis A86).

5.2.2 Festlegung der systemspezifischen Gegebenheiten

Das nachfolgend beschriebene System ist völlig willkürlich gewählt. In einzelnen Details werden Annahmen getroffen, die ausschließlich dazu dienen, daß Modell möglichst komplex zu gestalten, um alle Teilsysteme und ihr Verhalten während des betrachteten Brandverlaufs zu demonstrieren.

Als Brandereignis möge folgendes Szenarium dienen:

- Der Brandentstehungsraum befindet sich im Erdgeschoß eines mehrstöckigen Industriegebäudes. Ein Kellergeschoß existiert nicht.
- Der Brand bricht während der Produktionszeit in einem Raum aus, der nicht ständig von Personal aufgesucht wird ($\approx 1/3$ der Zeit anwesendes Betriebspersonal).
- Im Brandbekämpfungsabschnitt sind ebenfalls nur ca. $1/3$ der Zeit Personen anwesend (während der Produktion).
- Brandentstehungsraum und Brandbekämpfungsabschnitt werden durch eine Brandmeldeanlage überwacht, an der ausschließlich Rauchmelder angeschlossen sind.

Auslegungstemperatur:	300°C
Fraktile:	5 %
Variationskoeffizient:	0,75.

- Der angrenzende Brandabschnitt wird ebenfalls durch eine Brandmeldeanlage mit Rauchmeldern überwacht. Dort befindet sich auch die Brandmeldezentrale (separater Raum), die durch Brandeinwirkung ausfallen könnte, wenn der Raumabschluß zur Zentrale verloren geht. Die Auslegungstemperatur wird relativ hoch angesetzt, weil die Temperaturentwicklung im angrenzenden Brandabschnitt nicht wie die im betrachteten Brandabschnitt aussehen wird.

Auslegungstemperatur :	800°C
Fraktile :	5 %
Variationskoeffizient :	0,3.

- Eine Verbindung zwischen Systemen im Brandraum mit Systemen außerhalb des Brandraums möge existieren, sodaß hierdurch eine Brandmeldung infolge Störsignale ausgelöst werden kann. Die Systeme werden jedoch nicht ständig überwacht.

- Die vertikalen Umfassungsbauteile des Raumes sind leichte Trennwände (Sonderbauteile) mit einer geschätzten Feuerwiderstandsdauer von 20 min. Feuerschutzabschlüsse sind dort nicht eingebaut. Die Türen mögen ständig geschlossen sein (Anderenfalls braucht der Raum überhaupt nicht untersucht zu werden !). Ihre Feuerwiderstandsdauer entspricht der der leichten Trennwände.

Feuerwiderstandsdauer:

Leichte Trennwände: 20 min

- Decke und Boden des Brandraums bestehen aus Stahlbeton mit einer Feuerwiderstandsdauer von 90 min. Sie werden im Teilsystem "Brandbekämpfungsabschnitt" erfaßt und brauchen daher im Teilsystem "Raumabschluß" nicht berücksichtigt zu werden.
- Die brandabschnittsbildenden Bauteile weisen alle eine Feuerwiderstandsdauer von 90 min auf. Außer der Decke (Boden) und den Stahlbetonwänden sind Stahlstützen zur Abtragung der Deckenlasten in den Untergrund vorhanden. Das Versagen der Stahlstützen würde den Verlust des Raumabschlusses zum darüber liegenden Brandbekämpfungsabschnitt bedeuten.

Feuerwiderstandsdauer:

Stahlbeton-Bauteile: 90 min

Stahl-Bauteile: 90 min

- Im Brandbekämpfungsabschnitt sind sowohl dauernd geschlossene, wie auch dauernd geöffnete Feuerschutzabschlüsse eingebaut. Ihre Feuerwiderstandsdauer beträgt 90 min.

Feuerwiderstandsdauer:

Feuerschutzabschlüsse: 90 min

- Als weitere Sonderbauteile führen Kabelabschottungen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 90 min zu angrenzenden Brandbekämpfungsabschnitten.

Feuerwiderstandsdauer:

Kabelabschottungen: 90 min

- Brandschutzklappen sind im Brandbekämpfungsabschnitt, nicht jedoch im Brandentstehungsraum eingebaut. Ihre Feuerwiderstandsdauer beträgt 90 min.

Schmelzlotauslöser Zuluftkanal:

Auslegungstemperatur: 150°C

Fraktile: 5 %

Variationskoeffizient: 0,1

Feuerwiderstandsdauer:

Brandschutzklappen: 90 min

Lüftungsleitungen:

Auslegungstemperatur: 450°C

Fraktile: 10 %

Variationskoeffizient: 0,30

- Eine Rauch- und Wärmeabzugsanlage existiert sowohl im Brandentstehungsraum wie auch im Brandbekämpfungsabschnitt. Sie werden über die gleiche Anlage angesteuert. Selbstauflösende Bauteile sind eingebaut.

Schmelzlotauslöser:

Auslegungstemperatur: 92°C

Fraktile: 5 %

Variationskoeffizient : 0,10

Selbstauflösende Bauteile:

Auslegungstemperatur: 150°C

Fraktile:	10 %
Variationskoeffizient:	0,20

- Eine Sprinkleranlage ist installiert, um Lagergut zu schützen.

Selbstausslöser (Flüssigkeitsgläschen):

Auslegungstemperatur:	72°C
Fraktile:	5 %
Variationskoeffizient:	0,10

Komponenten der Anlage:

Auslegungstemperatur:	600°C
Fraktile:	20 %
Variationskoeffizient:	0,40

Brandausbreitung:

Ausbreitungsgeschwindigkeit:	0,30 m/min
Versagensgrenze:	300 m ²
Variationskoeffizient:	0,50

- Zur Erstbrandbekämpfung sind überall Wandhydranten mit C-Rohranschluß installiert. Das Löschmittel "Wasser" eignet sich gut zur Brandbekämpfung der vorwiegend vorhandenen Stoffe (Brandklasse A).

Brandausbreitung:

Ausbreitungsgeschwindigkeit:	0,30 m/min
Versagensgrenze:	40 m ²
Variationskoeffizient:	1,00

- Als betriebliche Feuerwehr steht eine anerkannte Werkfeuerwehr zur Verfügung.

Brandausbreitung:

Ausbreitungsgeschwindigkeit:	0,30 m/min
------------------------------	------------

Versagensgrenze:	400 m ²
Variationskoeffizient:	0,50

- Als öffentliche Feuerwehr wird zunächst eine ortsansässige Freiwillige Feuerwehr alarmiert, die später durch nachalarmierte Einheiten verstärkt wird. Die Brandmeldung erfolgt von der Brandmeldezentrale des Betriebes direkt zur örtlichen Feuerwache.

Brandausbreitung:

Ausbreitungsgeschwindigkeit:	0,30 m/min
Versagensgrenze:	2000 m ²
Variationskoeffizient:	0,25

- Die sich aus Menge, Art und Verteilung der Brandlast sowie den Lüftungsverhältnissen ergebende (angenäherte) Temperatur-Zeitkurve ist in Abschnitt 5.2.3 dargestellt. Eine bestimmte Brandlast wird für dieses Berechnungsbeispiel nicht festgelegt.

5.2.3 Festlegung des zu betrachtenden Temperatur-Zeitverlaufs

Die Festlegung von Temperatur-Zeitkurven gehört ebenso zu einer Systemanalyse wie die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten. Zur Ermittlung dieser Temperatur-Zeitkurven bei definierten Brandbedingungen sind entweder Wärmebilanzrechnungen erforderlich oder man bedient sich bekannter Kurven von vergleichbaren Verhältnissen. Für dieses Berechnungsbeispiel soll die Annahme eines beliebig ermittelten bilinearen Temperatur-Zeitverlaufs genügen. Seine Darstellung erfolgt in Bild 5.1. Zum Vergleich wird ihm die Einheits-Temperaturzeitkurve gegenübergestellt. Die Kennwerte des betrachteten Brandverlaufs lauten:

zur Analyse bei abnehmender Temperatur wurde in Abschnitt 4 vorgestellt.

Im Programm zur Datensatzerstellung wurde ein Algorithmus implementiert, der eine iterative Lösung der Gleichung $E_{\text{Natur}} = E_{\text{ETK}}$ (Gl. 4.28) nach der äquivalenten Branddauer t_a für jeden Untersuchungszeitpunkt erlaubt.

5.2.4 Festlegung der maßgebenden Zeitpunkte

Zur Festlegung der maßgebenden Zeitpunkte für das Eintreten von Ereignissen allgemeiner Art müssen vier Fälle unterschieden werden:

1. Ereignisse, die von Anfang an berücksichtigt werden müssen, weil ihre Elemente zu Beginn des Brandes eine definierte Sicherheit aufweisen, die während des unvermindert zunehmenden Brandes gegen Null strebt. Nach Erreichen einer bestimmten Beanspruchung fallen diese Elemente völlig aus und brauchen nicht weiter berücksichtigt zu werden.
2. Ereignisse, deren Elemente sowohl zu Beginn des Brandes wie nach Überschreiten einer definierten Beanspruchung nicht wirksam sind und daher nur innerhalb eines bestimmten Zeitraums einen meßbaren Einfluß auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems haben.
3. Ereignisse, die nur eintreten können, wenn ihnen andere Ereignisse vorausgegangen sind.
4. Ereignisse, die zu jeder Zeit eintreten können.

Zu den erstgenannten Ereignissen zählen z.B. die passiven Brandschutzmaßnahmen (Brandwände, Feuerschutzabschlüsse, etc.). Eine Festlegung auf zeitvariante oder zeitinvariante

Ereignisse ist jedoch nicht möglich. Dies gilt auch für die zweite und dritte Gruppe von Ereignissen, zu denen z.B. das Auslösen von Schmelzloten oder der Beginn der Löscharbeiten durch die öffentliche Feuerwehr zählen. Nur die vierte Art von Ereignissen kann eindeutig als zeitinvariant festgelegt werden, wozu z.B. die personelle Brandmeldung zählt.

Eine Systemanalyse, die alle möglichen Ereignisse ab dem Zeitpunkt des flash-over berücksichtigt, hat für die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems keinen Aussagegehalt. Steht jedoch die Untersuchung einzelner Ereignisse im Vordergrund, um bestimmte Schwachpunkte des Systems zu lokalisieren und ggf. zu optimieren, kann die Berücksichtigung dieser Ereignisse zu jedem Zeitpunkt des Brandes sinnvoll erscheinen. Der Einfluß der Komponente auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems wird dann für den gewählten Zeitschritt kalkulierbar. Das gilt z.B. für das Studium eines früheren Erscheinens der öffentlichen Feuerwehr.

Zur nachfolgenden Systemanalyse, die die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Systems unter Berücksichtigung der einzelnen Brandschutzmaßnahmen zum Ziel hat, ist die Festlegung der einzelnen Ereigniszeitpunkte notwendig. Diese Zeitpunkte sind selbst vom betrachteten Ereignis abhängig. Handelt es sich um die Meldung eines Brandmelders an eine Brandmeldeanlage, so kann dafür eine bestimmte Verzögerungszeit "eingebaut" werden, nach der die Alarmgabe der Brandmeldezentrale zu erfolgen hat. Der Beginn der Löscharbeiten durch die öffentlichen Feuerwehr kann nur aus Statistiken abgeschätzt werden. Der Zeitpunkt, zu dem die Feuerwehr am Brandobjekt eintrifft, unterliegt großen Streuungen und muß daher mit den örtlichen Gegebenheiten verglichen werden (Berufsfeuerwehr vor Ort, Verkehrsverhältnisse, Entfernung von der Feuerwache, Übermittlungswege).

Aus statistischen Untersuchungen in /24/ gehen einige Zeiten für wichtige Ereignisse des Brandverlaufs hervor. Sie stammen aus Einsatzstatistiken tatsächlicher eingetretener Brände.

Aus Tabelle 5.1 kann für eine Freiwillige Feuerwehr geschlossen werden, daß nach erfolgter Brandmeldung von der Brandmeldezentrale direkt zur Feuerwache im Mittel ca. 12 min bis zum Beginn der Löscharbeiten vergehen. Dem wird unterstellt, daß die Brandmeldezentrale des Industriebetriebes direkt mit der örtlichen Feuerwehr verbunden ist. Für die Werkfeuerwehr folgt aus Tabelle 5.1 eine Zeit von ca. 8 min, die sich auf ca. 3,5 min verkürzt, wenn man annimmt, daß die Werkfeuerwehr bis zum Eintreffen der öffentlichen Feuerwehr einen Schnellangriff durchführen wird.

Tabelle 5.1 Zeiten für den Ereignisablauf eines Brandes

Ereignis		Zeitbedarf [min]	Mittelwert [min]
(Brandentstehung)	Personen	0 - ∞	- ¹⁾
- Brandentdeckung	Detektoren	0 - 6	2,5
(Brandentdeckung)	Personen	0,5 - 10	- ¹⁾
- Brandmeldung	Detektoren	0	0
(Brandmeldung)	direkt über Feuerwache	0,5 - 1	- ¹⁾
- Ausrücken der Feuerwehr	über Brandmeldezentrale - Feuerwache	1 - 1,5	- ¹⁾
(alle Feuerwehren)	über Polizei - Feuerwache	1,5 - 2	- ¹⁾
(Ausrücken)	Werkfeuerwehr	2	2
- Eintreffen der Feuerwehr	Berufsfeuerwehr	4	4
	Freiwillige Feuerwehr	6	6
(Eintreffen)	Schnellangriff	0,5	0,5
- Löschbeginn der Feuerwehr	Angriff mit Verteiler (Wasserentnahmestelle, Lange Wegstrecke)	2 - 8	- ¹⁾
¹⁾ keine Angaben			

Streuungen dieser Zeiten können nur insofern berücksichtigt werden, als für einen anderen Zeitpunkt eine erneute Systemanalyse vorgenommen wird. So könnten beispielsweise mehrere Analysen erfolgen, in denen die Ereigniszeitpunkte als Mittelwerte sowie als untere und obere Fraktilwerte Berücksichtigung finden. Bei einigen Brandschutzmaßnahmen genügt allerdings die Berücksichtigung des Mittelwertes, weil bei relativ großem Variationskoeffizienten die absoluten Streuungen um den Mittelwert sehr gering sind (Sprinkler- oder Schmelzlotauslöser).

Verzögerungszeiten für die Teilsysteme "direkte Brandmeldung", "Auslösung von Löschhilfeanlagen" sowie "Auslösung von RWA's" werden nicht angesetzt, weil die Systemanalyse mit dem Zeitpunkt des flash-over startet und jeden Augenblick mit der Auslösung von Elementen dieser Teilsysteme gerechnet werden muß.

Die direkte personelle Brandmeldung braucht bei der Systemanalyse überhaupt nicht berücksichtigt zu werden, weil unter der Voraussetzung, daß nur 1/3 der Zeit Betriebspersonal anwesend ist, der Sicherheitsindex β kleiner "0" wird.

Für die Komponenten "indirekte Brandmeldung" und "Brandbekämpfung durch Betriebspersonal" muß auch nach dem flash-over mit Verzögerungszeiten gerechnet werden. Das indirekt alarmierte Betriebspersonal muß nach der Brandentdeckung und -meldung zunächst die Geräte zur Brandbekämpfung aktivieren und zum Brandherd tragen. Gewisse Unerfahrenheit beim Umgang mit den Löschgeräten sollte ebenfalls nicht unberücksichtigt bleiben. Für die indirekte Brandmeldung muß die Verzögerungszeit individuell geschätzt werden (vgl. Abschnitt 2). Im Modell wird für die indirekte automatische Brandmeldung mit 5 min gerechnet, für die indirekte personelle Brandmeldung wird keine Verzögerungszeit angesetzt. Die Verzögerung der Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal wird nach der Brandentdeckung auf 1,5 min geschätzt. Die Auslösung von manuellen

Steuereinrichtungen wird ebenfalls ab dem Zeitpunkt $t=1,5$ min berücksichtigt.

Um durch das zeitvariante Ansprechen von anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen wie Schmelzlotauslösern oder das Versagen von passiven Brandschutzmaßnahmen die Anzahl nötiger Systeme nicht ins Uferlose ausarten zu lassen, wird wie folgt vorgegangen :

- Passive Brandschutzmaßnahmen werden immer berücksichtigt. Wenn sie ausfallen, wird ihr Sicherheitsindex auf den Wert $\beta=100$ gesetzt. Das Element existiert praktisch nicht mehr, weil seine Versagenswahrscheinlichkeit den Wert "0" annimmt.
 - Das temperaturabhängige Ansprechen von Auslöseorganen wird in drei Etappen simuliert. Dabei ist zu beachten, daß ihre Ansprechwahrscheinlichkeit mit zunehmender Temperatureinwirkung zunimmt. Es ist also zunächst der Sicherheitsindex nach Gleichung 4.11 und Tabelle 4.4 zu berechnen, aus Bild A10 die Ansprechwahrscheinlichkeit zu entnehmen, die Versagenswahrscheinlichkeit durch Invertierung (mit Gleichung 4.18) zu bilden und - für SYSREL - der Sicherheitsindex für das Versagen zu bestimmen. Die Berechnung des Sicherheitsindex ist durch eine einfache Funktion nicht mehr möglich und wird daher programmtechnisch mit Hilfe einer Iteration durchgeführt. "Per Hand" kann er jedoch einfach mit Hilfe einer grafischen Darstellung von $p_f = \Phi(-\beta)$ ermittelt werden, wie sie als Anlage 1 beigelegt ist.
1. Vor dem Ansprechen von Auslöseorganen wird der Sicherheitsindex auf den Wert $\beta=100$ gesetzt - das Element existiert praktisch noch nicht.
 2. Während das Element "aktiv" ist, wird der rechnerische Sicherheitsindex angesetzt.

3. Nach dem Ansprechen wird der Sicherheitsindex wieder auf einen großen Wert gesetzt ($\beta=50$), um SYSREL die Nichtexistenz des Elements vorzutäuschen. Der von Punkt 1 abweichende Wert wurde gewählt, um später im Datensatz das Versagen und das sichere Ansprechen der Elemente unterscheiden zu können. Für die Analyse mit SYSREL sind beide Werte gleichbedeutend (vgl. Abschnitt 5.1).

Nachfolgend sollen die für das betrachtete System geltenden Zeiten, zu denen die einzelnen Komponenten bzw. Teilsysteme aktiv werden, überschaubar dargestellt werden.

Tabelle 5.2 Eintretenszeiten einzelner Komponenten bzw. ganzer Teilsysteme

Komponente oder Teilsystem	Zeitverzug nach dem flash-over ($t=0$) in [min]
direkte Brandmeldung	0
indirekte personelle Brandmeldung	0
Auslösung der Sprinkleranlage	0
Auslösung der RWA	0
manuelle Auslösung von Steuereinrichtungen	1,5
Brandbekämpfung durch Betriebspersonal	1,5
Brandbekämpfung durch die Werkfeuerwehr	3,5
indirekte Brandmeldung der Brandmeldeanlage im angrenzenden Brandabschnitt	5
indirekte Brandmeldung durch Störsignale	5
Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr	12

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Ansprech- und Ausfallzeiten zeitvarianter Ereignisse

Die Bestimmung der Ansprech- und Ausfallzeiten von zeitvarianten Ereignissen bedarf noch nicht der Analyse mit dem Programm SYSREL. Hierzu reicht ein iteratives Berechnen der Sicherheitsindices mit dem selbstgeschriebenen Programm aus. Die Ermittlung der genannten Zeiten ist für die Analyse nicht uninteressant, weil gerade zu diesen Zeitpunkten Änderungen des Systems eintreten, die seine Versagenswahrscheinlichkeit beeinflussen.

Die Ergebnisse der Rechnungen sind chronologisch geordnet in Tabelle 5.3 dargestellt. Darin sind ausschließlich die Aktivitätszeiten der Ereignisse enthalten. Die systemspezifischen Zeiten wie das Eintreffen der öffentlichen Feuerwehr wurden im vorigen Abschnitt dargestellt. Die Festlegung unterschiedlicher Kennwerte (Variationskoeffizient, Fraktilwert oder Bauteilart) ergibt auch bei gleichem Widerstand unterschiedliche Aktivitätszeiten.

Die Berechnung der Versagenszeitpunkte einzelner Ereignisse ergab bei Variation der Eingangsparameter folgende Ergebnisse:

- Die Festlegung der Versagensgrenze einer Variablen beeinflusst direkt den Versagenszeitpunkt. Höhere Versagensgrenzen führen zu höheren Versagenszeitpunkten.
- Der Variationskoeffizient ist ein Maß für die Steigung bzw. Geschwindigkeit, mit der der Sicherheitsindex b dieser Variablen gegen "0" strebt. Der absolute Versagenszeitpunkt wird dadurch nicht beeinflusst. Je größer der Variationskoeffizient gewählt wird, desto größer ist auch die

Tabelle 5.3 Ansprech- und Versagenszeiten der zeitvarianten Ereignisse für den betrachteten Brandverlauf

Ereignis	Widerstand	Aktivitätszeit von ... bis [min]
Versagen der thermischen Selbstausröser der Sprinkleranlage	72°C	6,5 ... 8,0
Versagen der Schmelzlotauslöser der Rauch- und Wärmeabzugsanlage	92°C	8,5 ... 10,0
Versagen von selbstauflösenden Bauteilen zur Rauch- und Wärmeabfuhr	150°C	9,0 ... 13,5
Versagen der Schmelzlotauslösung am Zuluftkanal	150°C	14,5 ... 16,5
Versagen der Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal infolge zu großer Brandausbreitung	40 m ²	0,0 ... 18,5
Versagen der leichten Trennwände	20 min	0,0 ... 29,0
Versagen der Brandmeldeanlage im Brandabschnitt infolge Brandeinwirkung	300°C	0,0 ... 33,0
Versagen der Brandbekämpfung durch die Sprinkleranlage infolge zu großer Brandausbreitung	300 m ²	0,0 ... 38,0
Versagen der Brandbekämpfung durch die anerkannte Werkfeuerwehr infolge zu großer Brandausbreitung	400 m ²	0,0 ... 42,5
Versagen von Lüftungsleitungen	450°C	0,0 ... 43,0
Versagen von Komponenten der Löschhilföanlage infolge Brandeinwirkung	600°C	0,0 ... 46,5
Versagen der Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr infolge zu großer Brandausbreitung	2000 m ²	0,0 ... 85,5
Versagen von Stahlbeton-Bauteilen	90 min	0,0 ... 100,5
Versagen von Stahl-Bauteilen	90 min	0,0 ... 105,5
Versagen von Kabelschotts	90 min	0,0 ... 106,0
Versagen von Brandschutzklappen	90 min	0,0 ... 109,5
Versagen von Feuerschutzabschlüssen infolge Brandeinwirkung (dauernd geschlossen und dauernd geöffnet)	90 min	0,0 ... 112,5
Versagen der Brandmeldeanlage im angrenzenden Brandbekämpfungsabschnitt infolge Brandeinwirkung	800°C	0,0 ... 144,0

Geschwindigkeit. Hieraus folgt, daß der Sicherheitsindex b bei größerem Variationskoeffizienten zu Beginn kleiner sein muß.

- Bei Sicherheitselementen kann der Variationskoeffizient dazu benutzt werden, die Zeitdauer, während der das Element aktiv ist, zu steuern.
- Fraktilwerte steuern den absoluten Versagenszeitpunkt der Variablen. Je größer die Fraktile gewählt wird, desto früher versagt die Variable. Ebenso beeinflussen sie bei Sicherheitselementen die Aktivitätszeit, die mit zunehmendem Fraktilwert kleiner wird.

5.3.2 Zeitabhängige Versagenswahrscheinlichkeiten des Gesamtsystems

Die Berechnung der zeitabhängigen Versagenswahrscheinlichkeiten des Gesamtsystems ergab die in den Bildern 5.2 und 5.3 grafisch dargestellten Ergebnisse. Die Kurven stellen darin jeweils die von SYSREL ermittelte obere und die untere Schranke der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. des Sicherheitsindex dar.

Insgesamt muß festgestellt werden, daß von Beginn an eine relativ hohe Versagenswahrscheinlichkeit für den Ausfall von Brandschutzmaßnahmen besteht. Mit zunehmender Anzahl von Komponenten im System wächst diese Wahrscheinlichkeit merklich an. Ein erster Sprung ist zum Zeitpunkt $t=1,5$ min festzustellen, wenn das Teilsystem "Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal" sowie Komponenten, die eine mögliche Inbetriebnahme manueller Auslöseeinrichtungen von Brandschutzeinrichtungen beinhalten, zum Gesamtsystem hinzutreten. Zeitweise steigt die Versagenswahrscheinlichkeit sogar auf den oberen Grenzwert "1" - ein Ausfall von Brandschutzmaßnahmen ist mit großer Sicher-

heit zu befürchten. Der zugehörige untere Grenzwert weist zu diesem Zeitpunkt gegenüber dem restlichen Kurvenverlauf erhebliche Abweichungen zum oberen Grenzwert auf.

Die Maxima der Kurven charakterisieren die einzelnen Zeitpunkte, zu denen die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse zunimmt. Im Bereich der Aktivitätszeit von Sicherheitselementen, die bekanntlich mit zunehmender Zeit eine geringer werdende Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, nimmt die Systemversagenswahrscheinlichkeit merklich ab. Vergleicht man die Zeittabelle (Tabelle 5.2) mit den Bildern 5.2 und 5.3, so stellt man fest, daß im Zeitraum $t=8,0$ min bis $t=16,5$ min die Auslösung aller Sicherheitselemente erfolgt. Nach $t=13,5$ min findet ein merklicher Sprung in den Kurven statt, der das Ansprechen der Schmelzlotauslösung am Zuluftkanal kennzeichnet. Bis zu diesem Zeitpunkt ist es das Ereignis "Selbstausslösen von Bauteilen zur Rauch- und Wärmeabfuhr", welches maßgebenden Einfluß auf die Abnahme der Systemversagenswahrscheinlichkeit hat. Das Ansprechen der thermischen Selbstauslöser der Sprinkleranlage sowie der Rauch- und Wärmeabzugsanlage haben nur unwesentlichen Einfluß auf das Verhalten des Gesamtsystems.

Der Ausfall der Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal infolge zu großer Brandausbreitung findet zum Zeitpunkt $t=18,5$ min statt. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems wird davon wieder nur unwesentlich berührt.

An dieser Stelle wird bereits erkennbar, daß einzelne Ereignisse von anderen Ereignissen mehr oder weniger stark verdeckt werden. Bewirkt das Ereignis "Versagen der Schmelzlotauslösung am Zuluftkanal" noch eine Änderung der Systemversagenswahrscheinlichkeit um den Betrag 0,2, so kann das Ereignis "Versagen der Brandbekämpfung durch das Betriebspersonal infolge zu großer Brandausbreitung" völlig vernachlässigt werden.

Die nächste Änderung im Kurvenverlauf wird durch das Versagen der leichten Trennwände zum Zeitpunkt $t=29$ min hervorgerufen. Unter Berücksichtigung der in der Rechnung betrachteten Zeitpunkte und der stetigen grafischen Darstellung muß festgestellt werden, daß auch dieses Versagen die Systemversagenswahrscheinlichkeit mehr oder weniger sprunghaft beeinflusst; erst im Bereich $t=25$ bis $t=28$ min wird der Einfluß dieses Teilsystems auf die Systemversagenswahrscheinlichkeit spürbar (Zeitinkrement der Rechnung : 3 min).

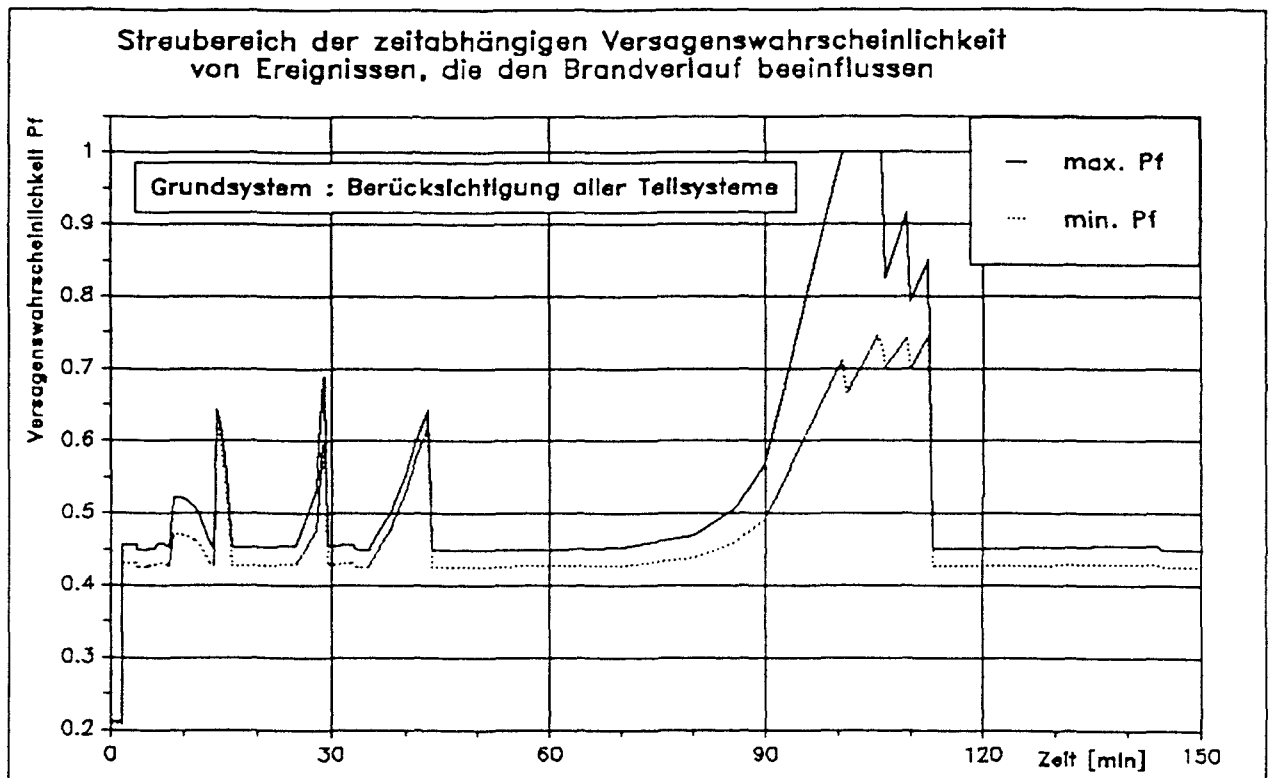


Bild 5.2 Versagenswahrscheinlichkeit p_f des Grundsystems

Das Versagen der Brandbekämpfung durch die Sprinkleranlage infolge zu großer Brandausbreitung ($t=38$ min) sowie durch die Werkfeuerwehr infolge zu großer Brandausbreitung ($t=42,5$ min) wirken sich nicht sichtbar auf die Versagenswahrscheinlichkeit

des Systems aus. Beide Ereignisse werden völlig durch das Versagen der Lüftungsleitungen überdeckt ($t=43$ min).

Nach dem Versagen der Lüftungsleitungen des Brandbekämpfungsabschnitts versagen weitere Komponenten der Löschhilfeanlage, die jedoch keinen Einfluß auf die Systemversagenswahrscheinlichkeit haben. Erst ab dem Zeitpunkt $t=70$ min nimmt die Versagenswahrscheinlichkeit wieder zu, wenn sich das Versagen von Bauteilen des Brandbekämpfungsabschnitts ankündigt. Das Versagen einzelner Bauteile kennzeichnet entsprechend seiner zeitlichen Kennwerte die Systemversagenswahrscheinlichkeit. Ob daran auch das Versagen der öffentlichen Feuerwehr infolge zu großer Brandausbreitung beteiligt ist, kann nur über eine Auswertung der Einflußfaktoren festgestellt werden. Vermutlich handelt es sich hier um das bereits bei der Sprinkleranlage und der Werkfeuerwehr festgestellte Phänomen.

Der Ausfall der Brandmeldeanlage im angrenzenden Brandbekämpfungsabschnitt zum Zeitpunkt $t=144$ min ändert die Systemversagenswahrscheinlichkeit nur noch unwesentlich.

Weil das Versagen einzelner Ereignisse scheinbar nichts an der Systemversagenswahrscheinlichkeit ändert, wurden Vergleichsrechnungen mit zwei vom Grundsystem abweichenden Systemen vorgenommen.

Mit der ersten Serie von Vergleichsrechnungen (System 1) wurde ab dem Zeitpunkt $t=5$ min eine erfolgreiche Brandmeldung simuliert. Das gesamte Teilsystem der Brandmeldung wurde dazu vernachlässigt. Die grafische Auswertung erbrachte exakt die gleichen Ergebnisse, wie sie bereits in den Bildern 5.2 bzw. 5.3 dargestellt sind.

In der zweiten Serie von Vergleichsrechnungen (System 2) wurde zusätzlich zum Teilsystem "Brandmeldung" das Teilsystem "Brandbekämpfung durch Löschhilfeanlagen" vernachlässigt. Das

Ergebnis ist in den Bildern 5.4 und 5.5 dargestellt. Die Abweichungen zum Grundsystem sind nur geringfügig und nur im Zeitraum $t=5$ min bis $t=13,5$ min festzustellen.

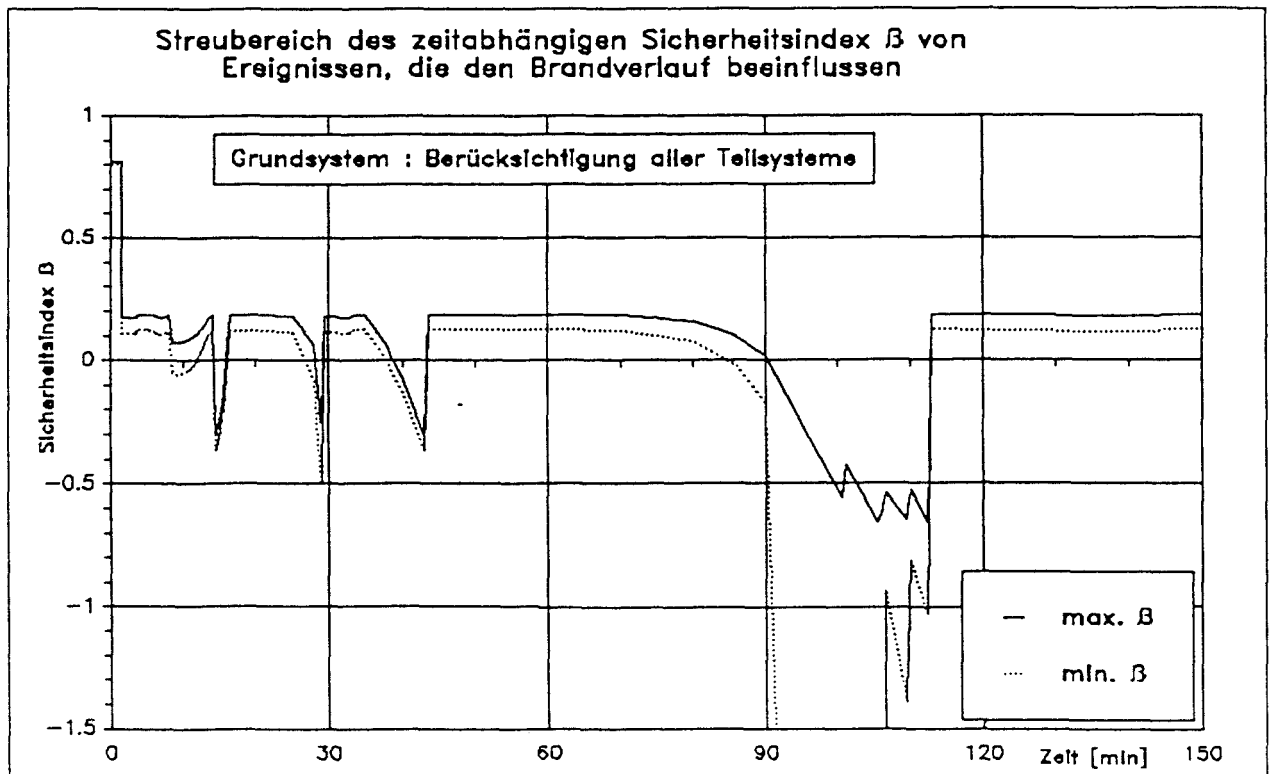


Bild 5.3 Sicherheitsindex β des Grundsystems

Diese wenig befriedigenden Ergebnisse gaben dazu Anlaß, das Programm zur Berechnung der zeitvarianten Sicherheitsindizes weiter zu modifizieren. Bisher wurde bei Ausfall eines Elementes weiter mit den anderen Elementen der betreffenden Komponente gerechnet, obwohl bereits der Ausfall eines Elementes das Versagen der gesamten Komponente hervorruft (ausschließlich "ODER"-Verknüpfungen). Das Problem, was bisher nicht berücksichtigt wurde, liegt in dem Reduktionsmechanismus

von SYSREL und dem setzen der Sicherheitsindices b auf eine Ausfallwahrscheinlichkeit von "0" ($b = 100$) mit dem eigenen Programm, wenn ihre Versagenswahrscheinlichkeit größer als $p_f=0,5$ wurde ($b < 0$). Hierdurch konnte von SYSREL nicht erkannt werden, daß die ganze Komponente bereits vollständig ausgefallen war. Programmtechnisch war dieses Vorgehen jedoch nötig, weil SYSREL sonst bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt keine vernünftige Systemversagenswahrscheinlichkeit mehr hätte berechnen können.

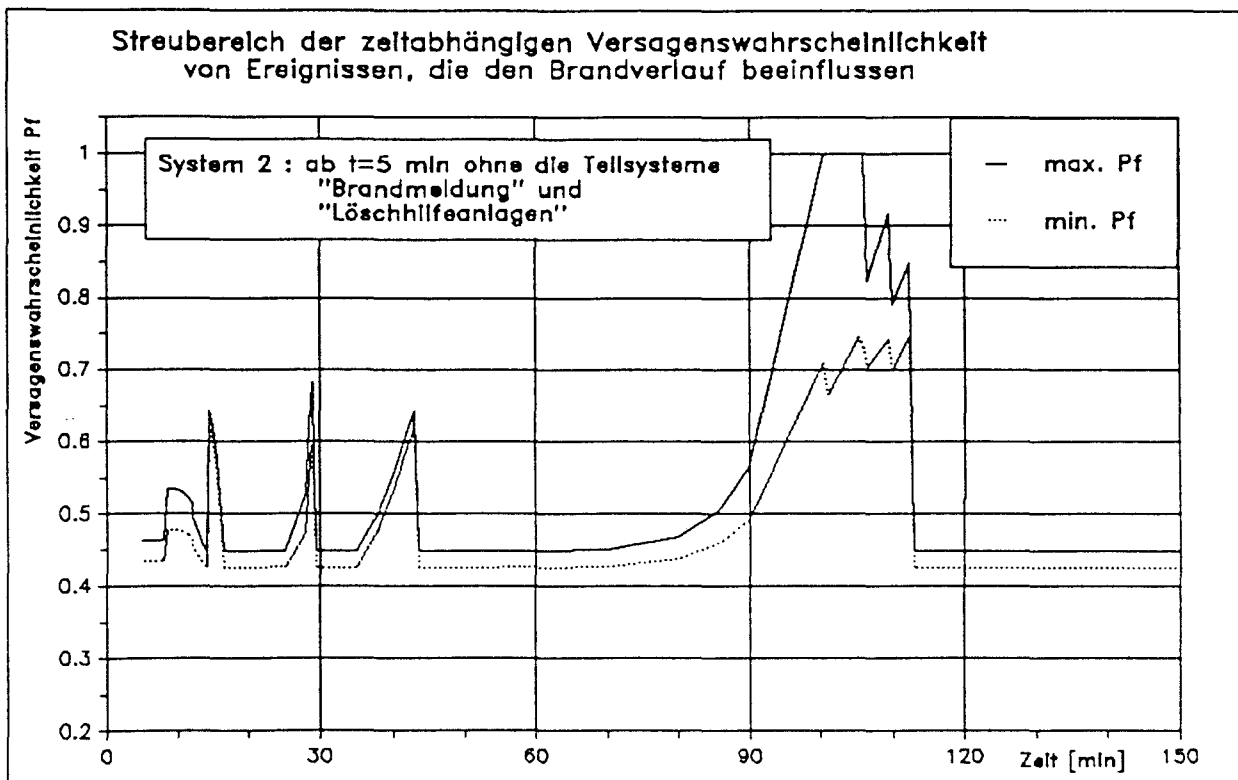


Bild 5.4 Versagenswahrscheinlichkeit p_f des Systems 2

Das Programm zur Berechnung der Sicherheitsindices wurde dahingehend geändert, daß nach Ausfall nur eines Elementes einer Komponente die Versagenswahrscheinlichkeit aller anderen Elemente der betreffenden Komponente ebenfalls auf "0" gesetzt

wurden. Für Komponenten, die Sicherheitselemente beinhalten, gilt dieses Vorgehen jedoch nicht. Das Programm SYSREL wurde damit zu einer Reduktion des Gesamtsystems gezwungen; die Systemversagenswahrscheinlichkeit wurde ohne die bereits in irgendeiner Weise ausgefallene Komponente ermittelt.

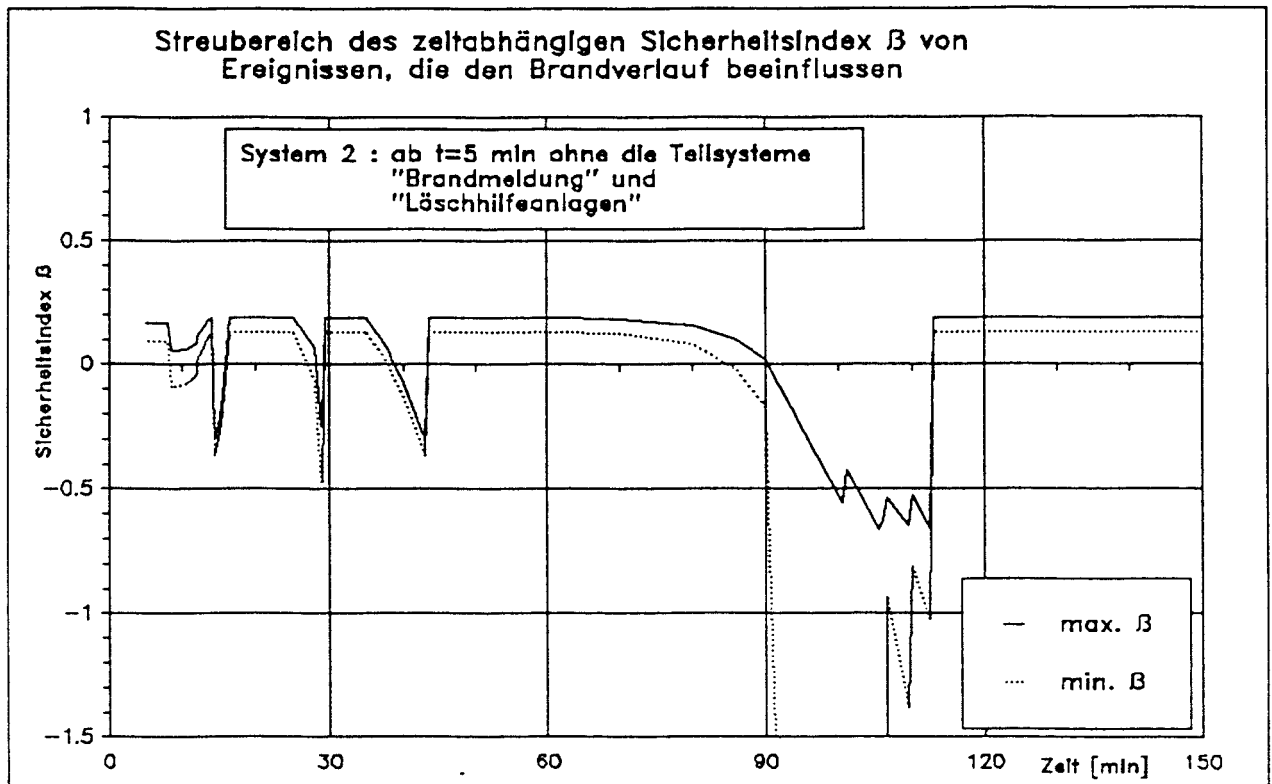


Bild 5.5 Sicherheitsindex β des Systems 2

Ergebnisse dieser Rechnungen sind in den Bildern 5.6 bis 5.9 dargestellt. Hierbei handelt es sich wieder um die den Bildern 5.2 bis 5.5 zugeordneten Systeme (Grundsystem und System 2).

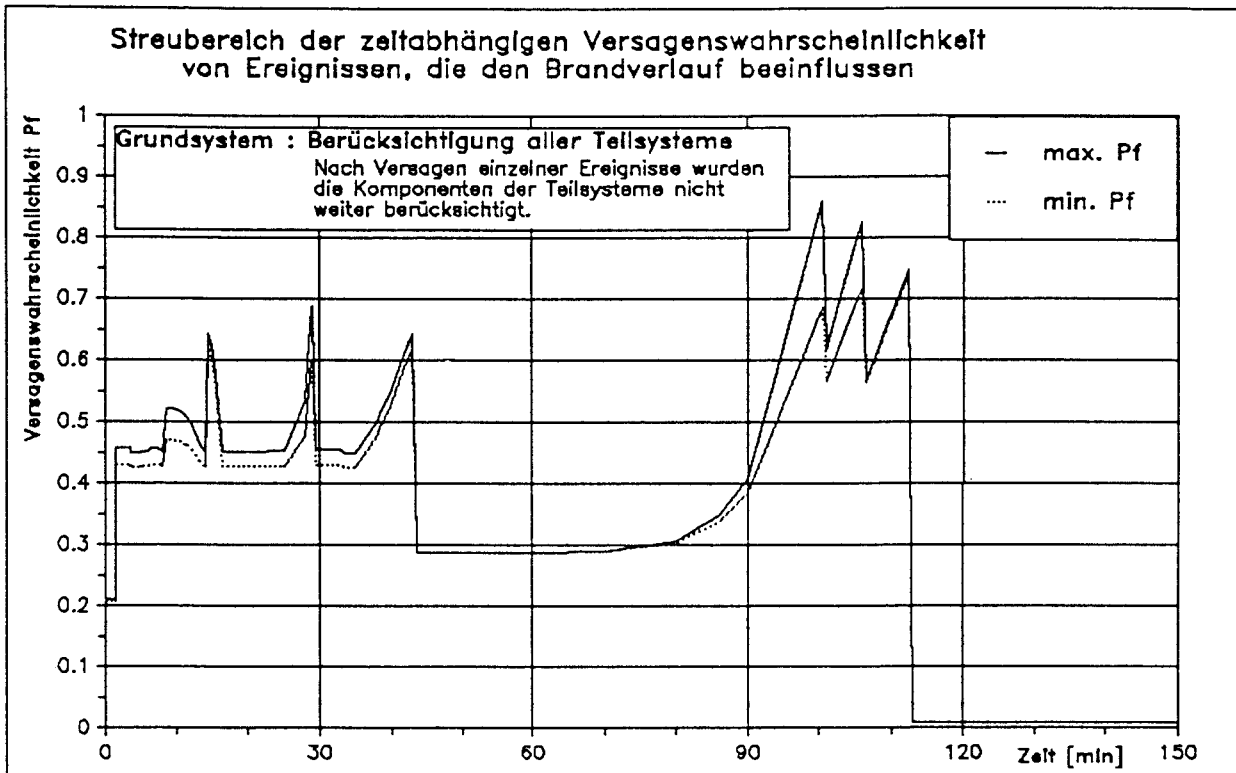


Bild 5.6 Versagenswahrscheinlichkeit p_f des Grundsystems

Unterschiede werden erst nach dem Versagen der Lüftungsleitungen deutlich ($t=43$ min). Die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems sinkt dann auf ca. $p_f=0,3$ ab, was einer Differenz von ca. $\Delta p_f=0,15$ zum vorherigen Ergebnis entspricht. Diese Differenz vergrößert sich noch auf einen Wert von ca. $\Delta p_f=0,30$ bei Ausfall der Stahl- und Stahlbeton-Bauteile und sinkt anschließend auf $\Delta p_f \approx 0,10$ ab. Nach dem Ausfall der Feuerschutzabschlüsse ($t=112,5$ min) nähert sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems dem Wert 0,01. Zu diesem Zeitpunkt sind nur noch Komponenten des Systems aktiv, die keine zeitvarianten Ereignisse enthalten, die zum Ausfall der gesamten Komponente geführt hätte. Dazu zählen Komponenten, die ausschließlich zeitinvariante Versagensereignisse und/oder

Sicherheitselemente enthalten. Die Sicherheitselemente selbst können von SYSREL zum diesem Zeitpunkt nicht mehr erfaßt werden, weil ihre Ausfallwahrscheinlichkeit praktisch "0" ist ($\beta = 50$).

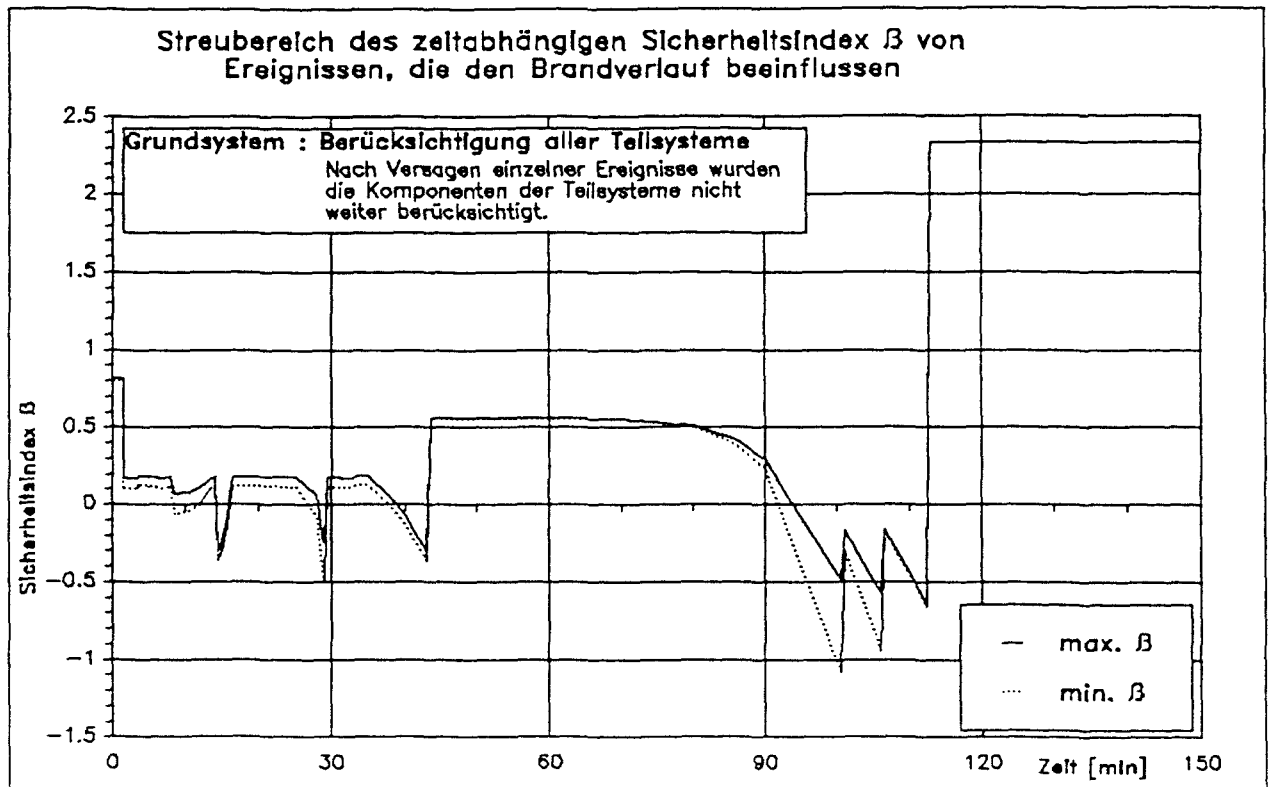


Bild 5.7 Sicherheitsindex β des Grundsystems

Als weitere Vergleichsrechnung wurde die zeitabhängige Systemversagenswahrscheinlichkeit mit veränderten Feuerwiderstandsdauern der Bauteile und Sonderbauteile ermittelt. Die Feuerwiderstandsdauern wurden statt bisher 90 min auf 30 min abgemindert. Die Systemversagenswahrscheinlichkeit wurde mit dem Grundsystem unter Berücksichtigung des Ausfalls ganzer Komponenten bei Ausfall einzelner Elemente ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 5.10 und 5.11 dargestellt.

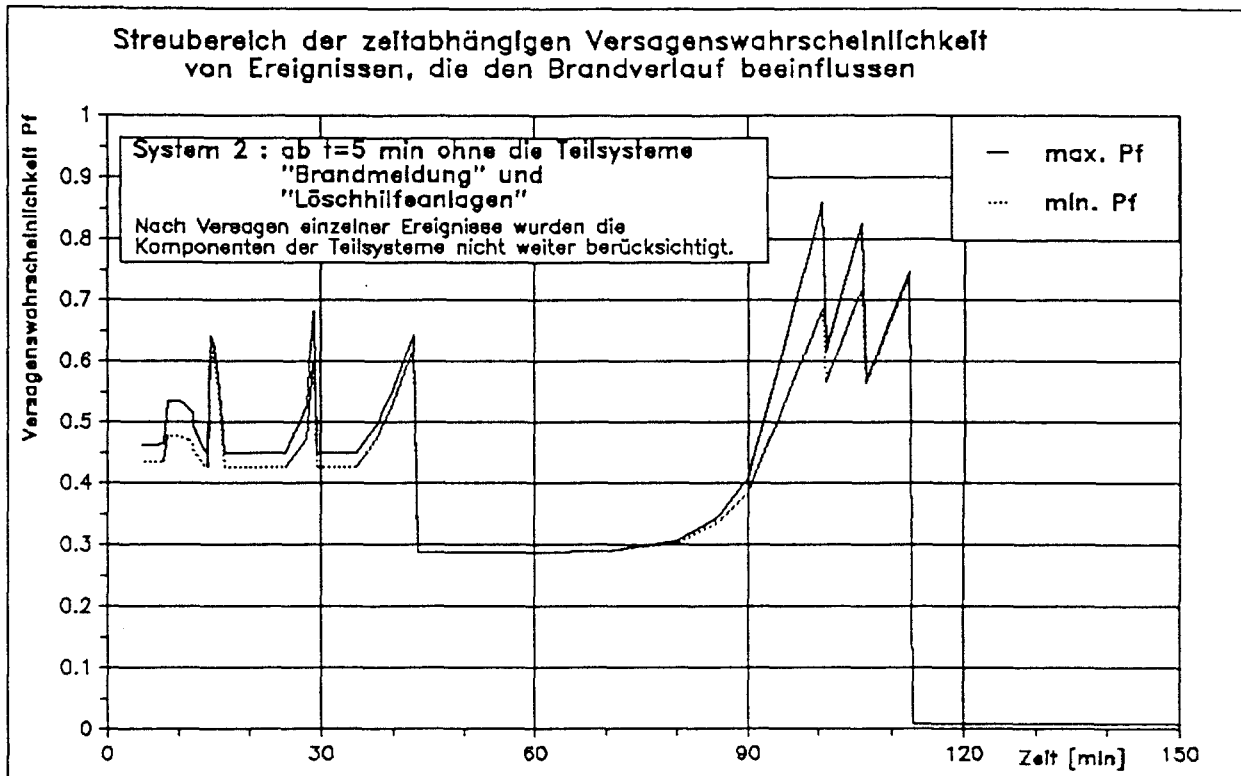


Bild 5.8 Versagenswahrscheinlichkeit p_f des Systems 2

Die nunmehr durch SYSREL stattfindende Berücksichtigung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Bauteile im Zeitraum $t=30$ min bis $t \approx 40$ min ändert die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems entsprechend. Zum Zeitpunkt des Versagens der Sprinkleranlage wächst die Systemversagenswahrscheinlichkeit auf den Wert "1". Hier muß natürlich beachtet werden, daß die Sprinkleranlage selbst immer noch keinen Einfluß auf die Systemversagenswahrscheinlichkeit hat. Vielmehr haben sich die Zeitpunkte für das Versagen der Bauteile in diesen Zeitraum verlagert. Nach dem Versagen der Lüftungsleitungen ($t=43$ min) sinkt die Versagenswahrscheinlichkeit auf nahezu "0" ab. Im weiteren Verlauf treten keine wesentlichen Änderungen mehr auf - ein Zeichen dafür, daß der Einfluß der

öffentlichen Feuerwehr insgesamt vernachlässigbar ist. Auf eine Darstellung wurde aus diesem Grunde verzichtet.

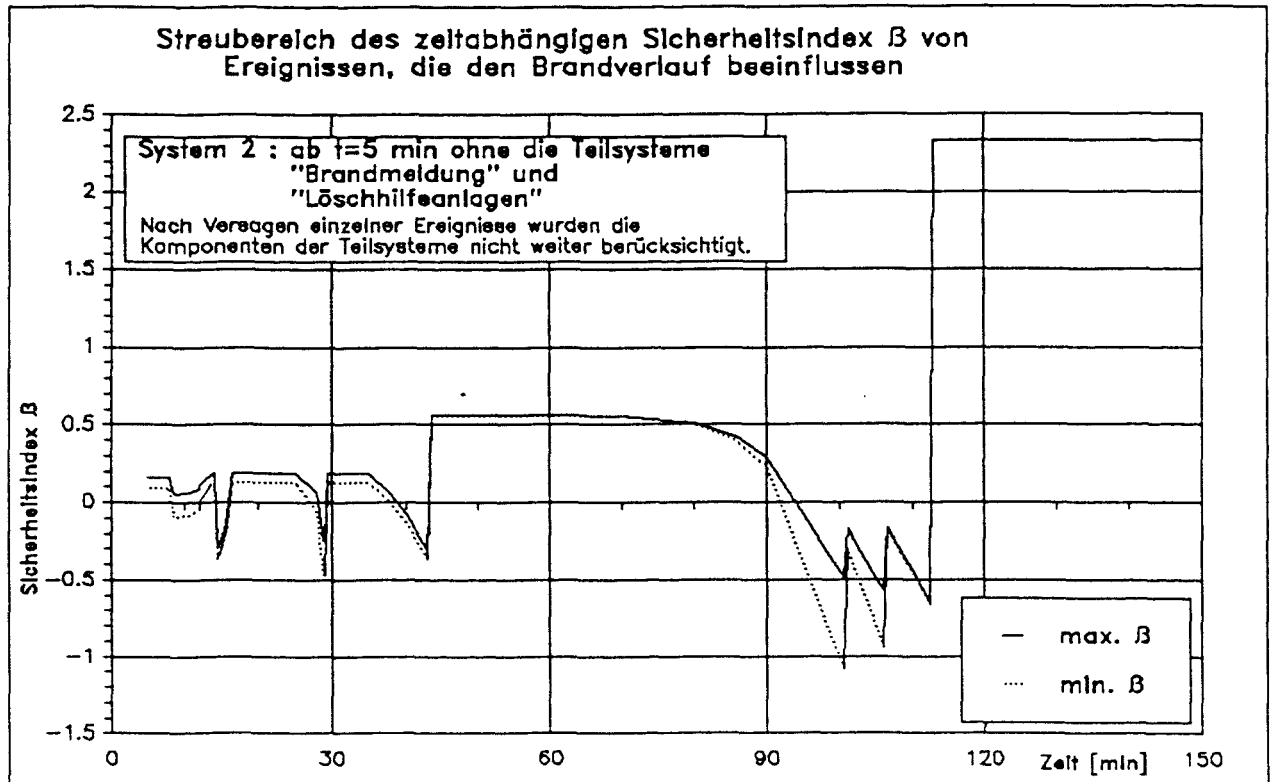


Bild 5.9 Sicherheitsindex β des Systems 2

Für das Grundsystem der Bilder 5.6 bis 5.7 wurde eine Auswertung der Einflußfaktoren α_{ik} vorgenommen. Die im Ergebnis von SYSREL enthaltenen Werte wurden dazu mit Hilfe eines selbstgeschriebenen Fortran-Programms herausgelesen und in prozentuale Anteile an der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des Systems umgerechnet.

Das Ergebnis ist in Bild 5.12 dargestellt. Hier zeigt sich besonders deutlich, daß die Systemversagenswahrscheinlichkeit

insgesamt von nur wenigen Komponenten beeinflusst wird. Die betreffenden Komponenten sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten und für unterschiedliche Zeitdauern aktiv. Die einflußreichsten Komponenten sind:

- leichte Trennwände des Brandraumes,
- F-90 Bauteile und F-90 Sonderbauteile des Brandbekämpfungsabschnitts,
- Feuerschutzabschlüsse des Brandbekämpfungsabschnitts,
- Löschhilfeanlage,
- Rauch- und Wärmeabzugsanlage,
- Lüftungsabschluß des Brandbekämpfungsabschnitts.

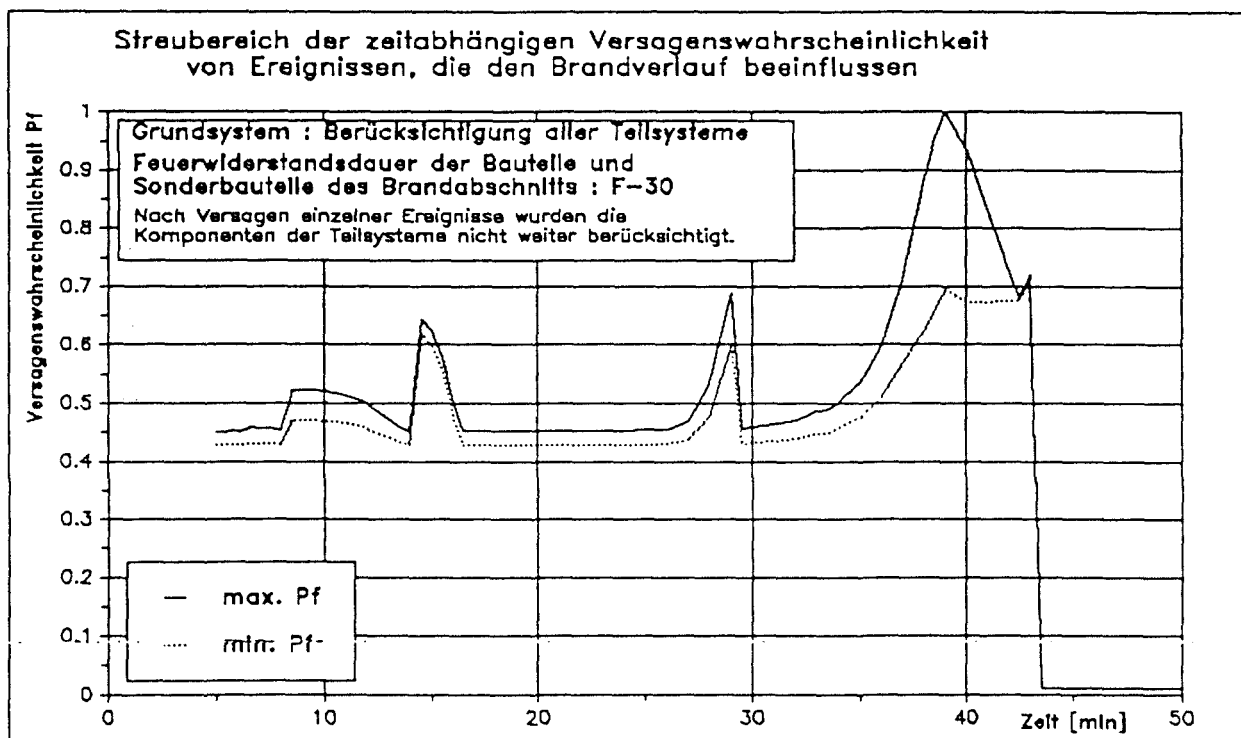


Bild 5.10 Versagenswahrscheinlichkeit p_f des Systems 3
(Grundsystem mit F-30 Bauteilen)

Bei der Löschhilfeanlage sei bemerkt, daß sie nur zu Beginn der Systemanalyse einen Einfluß auf die Gesamtversagenswahr-

scheinlichkeit ausübt - zu diesem Zeitpunkt sind nur wenige Komponenten aktiv. Mit fortschreitender Zeit nehmen die Versagenswahrscheinlichkeiten anderer Komponenten derart zu, daß das Versagen der Löschhilfeanlage im Hinblick auf die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit vernachlässigt werden kann.

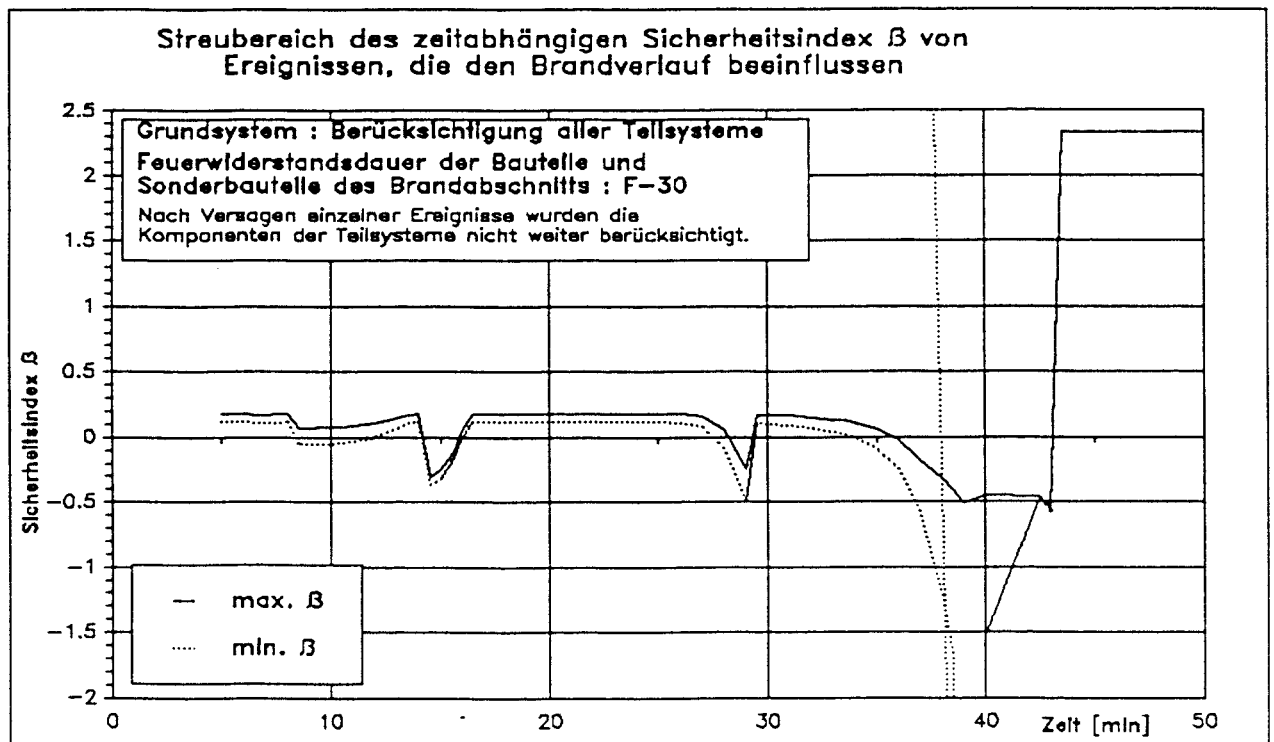


Bild 5.11 Sicherheitsindex β des Systems 3 (Grundsystem mit F-30 Bauteilen)

Vergleicht man Bild 5.12 mit den Darstellungen der Sicherheitsindices bzw. der Systemversagenswahrscheinlichkeit über die Zeit, so sind auffallende Parallelen festzustellen. Die Maxima in den Bildern 5.6 bzw. 5.7 sind in Bild 5.12 gut nachzuvollziehen. Desweiteren geht daraus eindeutig hervor, durch welche Komponenten die Maxima in den Bildern 5.6 bzw. 5.7 her-

vorgerufen werden. Im Bereich um die ersten 10 Minuten des Brandverlaufs (flash-over) wird das Maximum durch die manuelle Auslösung der RWA erzeugt, im Bereich von 28 min sind es eindeutig die leichten Trennwände.

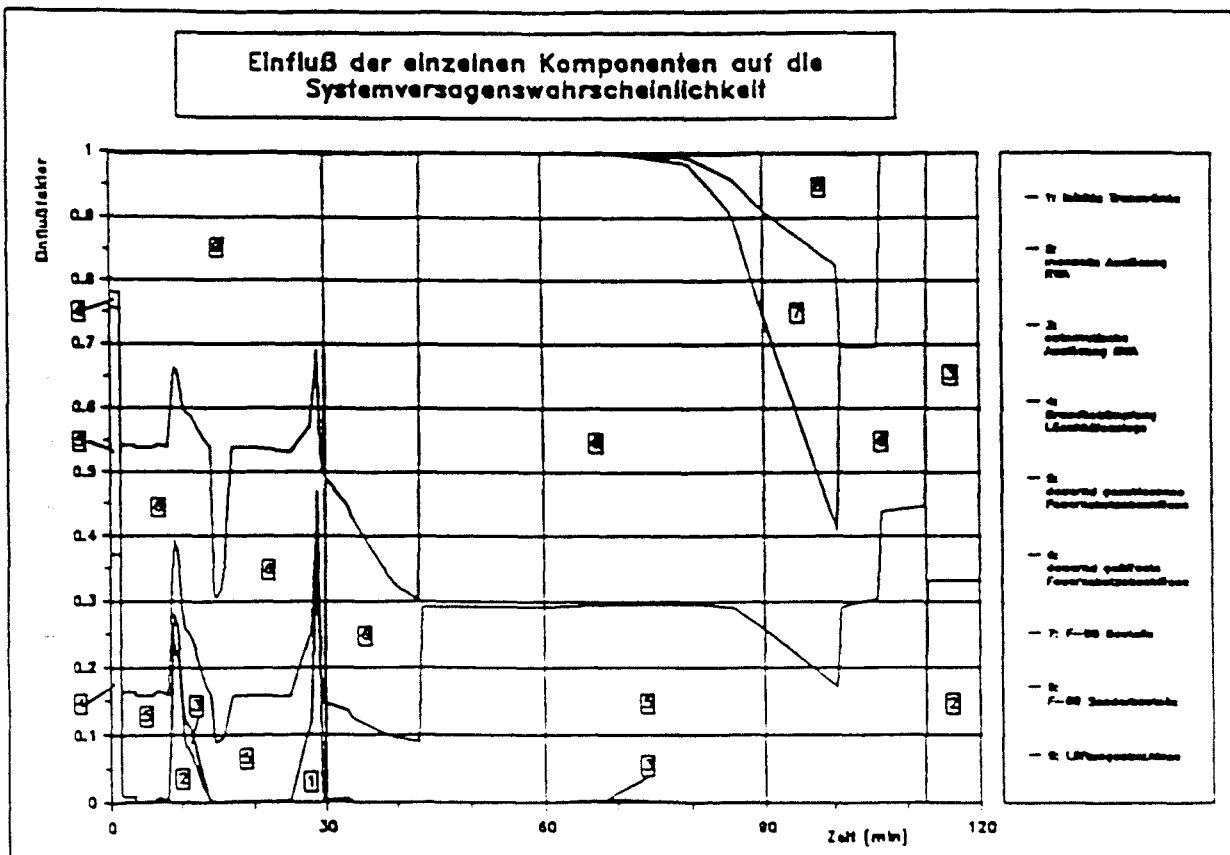


Bild 5.12 Verteilung der Systemversagenswahrscheinlichkeit auf die einzelnen Komponenten in Abhängigkeit von der Zeit

Für den Zeitpunkt $t=35$ min ergeben sich aus Bild 5.12 beispielsweise folgende Werte :

11,9 %	dauernd geschlossene Feuerschutzabschlüsse,
28,7 %	dauernd geöffnete Feuerschutzabschlüsse und
59,4 %	Lüftungsabschluß des Raumes.

6 ZUSAMMENFASSENDE WERTUNG UND AUSBLICK

Gegenstand dieses Vorhabens war die Untersuchung der Zuverlässigkeit von Brandschutzmaßnahmen im Industriebau. In Abschnitt 3 wurden dazu erstmalig systematisch und umfassend die möglichen Versagensereignisse der einzelnen Brandschutzmaßnahmen zusammengetragen und in zeitvariante sowie zeitinvariante Ereignisse eingeteilt. Für die zeitinvarianten Ereignisse wurden Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund von Literaturangaben und Expertenschätzungen angenommen. Wegen der damit verbundenen Unsicherheiten wurden die Ereignisse bewußt detailliert in Teilereignisse (Fehlerquellen) aufgespalten, um bei späteren Änderungen im Ansatz einzelner Versagenswahrscheinlichkeiten, z. B. weil die Schätzung erwiesenermaßen falsch war oder weil eigene Erhebungen andere Zahlenwerte als in der Literatur ergeben, die Werte problemlos austauschen und die Ergebnisse entsprechend modifizieren zu können. Außerdem wird auf diese Weise bei der "Systemanalyse" von Brandschutzkonzepten der Einfluß einzelner Ereignisse auf die Funktion der zugehörigen Brandschutzmaßnahme (Komponente) und auf das Gesamtsystem erfaßbar; Schwachpunkte des Gesamtkonzeptes und einzelner Brandschutzmaßnahmen können so leicht lokalisiert und im Zuge einer Optimierung eliminiert werden. Prinzipiell ist jedoch auch eine Zusammenfassung einzelner Ereignisse möglich, wodurch sich das zu untersuchende System reduziert und seine Berechnung vereinfacht.

In Abschnitt 4 wurden die zeitvarianten (d. h. die im Verlauf des Brandes wahrscheinlicher oder unwahrscheinlicher werden) Versagensereignisse untersucht. In Form von Verteilungsfunktionen wurden "Widerstände" (d. h. Beanspruchbarkeiten)

von Brandschutzmaßnahmen und "Einwirkungen" auf diese (d. h. Beanspruchungen) festgelegt und in sogenannten Grenzzustandsfunktionen einander gegenübergestellt. Die Ermittlung der zeitvarianten Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgte mit Hilfe der Zuverlässigkeitsmethode FORM (First Order Second Moment-Methode). Die ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten wurden grafisch aufbereitet und in bezogener Form dargestellt.

Der Ansatz von Widerständen und Einwirkungen wurde allgemein gehalten, um das Modell möglichst vielseitig für alle Brandschutzmaßnahmen verwenden zu können. Sollen viele Eingangsdaten berücksichtigt werden (Bsp.: Lastausnutzungsgrad von Bauteilen, Temperatur-Zeitverläufe unter Variation von Brandraumgeometrie, Brandlast und Ventilationsverhältnissen), so ist eine Darstellung in wenigen einfachen Funktionen nicht mehr möglich. Bei der Festlegung der Widerstände zeigte sich, daß nur wenige Daten zugänglich waren, die zur Ermittlung von zeitvarianten Versagenswahrscheinlichkeiten herangezogen werden konnten. Zum einen waren dies Ergebnisse von Normbrandprüfungen, die so aufbereitet wurden, daß damit unabhängig von der Feuerwiderstandsdauer des Bauteils eine Grenzzustandsfunktion für die Beanspruchung bei einem Normbrandversuch formuliert werden konnte. Zum anderen wurden Herstellerangaben und eigene Schätzungen, ausgehend von Literaturangaben, verwendet.

Als Brandeinwirkung wurde grundsätzlich entweder der Temperatur-Zeitverlauf bei einem Normbrandversuch nach DIN 4102 Teil 2 (ETK) oder eine als konstant angenommene Größe für die Brandausbreitungsgeschwindigkeit angenommen. Wirkungen von Löschmaßnahmen oder Eingriffe in die Lüftungsverhältnisse, die eine grundlegende Änderung der vorgegebenen Einwirkungen hervorgerufen hätten, blieben vorerst unberücksichtigt. Die Übertragung auf beliebige Temperatur-Zeitverläufe erfolgt durch den Vergleich der im Normbrandversuch und im natürlichen Brandverlauf freigesetzten "Wärmeenergie" und resultiert in einer Abminderung bzw. Erhöhung der Normbranddauer. Die mit

anderen Mitteln bestimmte Temperatur-Zeitkurve wird dazu auf einen trilinearen Temperatur-Zeitverlauf zurückgeführt.

In Abschnitt 5 erfolgte die Zuverlässigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Brandschutzmaßnahmen (Systemanalyse). Aus Literaturangaben sowie eigenen Schätzungen wurden für das vorgegebene System zunächst die maßgebenden Zeitpunkte für das Eintreten bestimmter Ereignisse festgelegt, aus denen sich für unterschiedliche Betrachtungszeitpunkte verschiedene Systemkonstellationen ableiten. Für die interaktive Analyse der Systemzuverlässigkeit mit dem Rechenprogramm SYSREL wurden zwei Eingabedatensätze für jeden Betrachtungszeitpunkt erstellt. Anhand des ersten Datensatzes mit den diversen "UND"- und "ODER"-Verknüpfungen des System der Brandschutzmaßnahmen wurde dieses zunächst auf seine minimale Schnittmenge zurückgeführt. Der zweite Eingabedatensatz enthielt die Sicherheitsindices für die einzelnen Ereignisse, wobei die zeitvarianten Sicherheitsindices über die mit FORM ermittelten Funktionen bestimmt und mit den zeitinvarianten Sicherheitsindices verknüpft wurden. Unter Berücksichtigung der Sicherheitsindices einzelner Ereignisse einer Komponente wurde die gesamte Komponente in ihrer Funktionsfähigkeit als "noch intakt" oder "bereits ausgefallen" bewertet. Durch die Tatsache, daß der Ausfall eines einzelnen Ereignisses bereits den Ausfall der gesamten Komponente bewirkt, wenn die Ereignisse ausschließlich durch "ODER"-Gatter miteinander verknüpft sind, reduzierte sich das Gesamtsystem.

Die Ergebnisse der Systemanalyse zeigen, daß das Versagen des Gesamtsystems der Brandschutzmaßnahmen in der Regel durch einige wenige Komponenten (Schwachstellen) dominiert wird. Die Konstellation dieser Komponenten ändert sich mit der Zeit, weil sich infolge der Zeitvarianz sowohl die Zuverlässigkeit einzelner Ereignisse wie auch die gesamte Systemkonstellation ändern.

Bei dem beispielhaft betrachteten System wird die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems über die gesamte Branddauer stark von dem Funktionszustand der Feuerschutzabschlüsse beeinflusst. Da diese im geschlossenen Zustand erst nach ca. 112 min versagen, ist vorwiegend das nicht ordnungsgemäß erfolgte Schließen der Feuerschutzabschlüsse (z. B. durch menschliches Versagen) kritisch, das unmittelbar zu einer Brandausbreitung über den Brandbekämpfungsabschnitt hinaus führen kann. Eine Löschhilfeanlage kann erwartungsgemäß nur in den ersten Minuten die Systemversagenswahrscheinlichkeit beeinflussen, weil ihre Zuverlässigkeit danach brandbedingt rasch abnimmt. Die Auslösung der Rauch- und Wärmeabzugsanlage ist im Zeitraum von ca. 10 min kritisch. Der Lüftungsabschluß des Brandbekämpfungsabschnitts über die Lüftungsleitungen hat während der ersten 40 min einen großen Anteil an der Versagenswahrscheinlichkeit des Systems.

Anders als die anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen bleiben die passiven baulichen Brandschutzmaßnahmen bis zu einem relativ späten Zeitpunkt des Brandgeschehens mit ausreichender Zuverlässigkeit funktionsfähig. Sie stellen somit auch dann noch eine letzte Sicherheitsbarriere dar, wenn bereits alle anderen relevanten Maßnahmen ausgefallen sind. Über die Zuverlässigkeit der passiven Brandschutzmaßnahmen läßt sich die Wahrscheinlichkeit einer Brandausbreitung auf Nachbarabschnitte daher wirksam minimieren und damit der maximal mögliche Brandschaden am besten steuern.

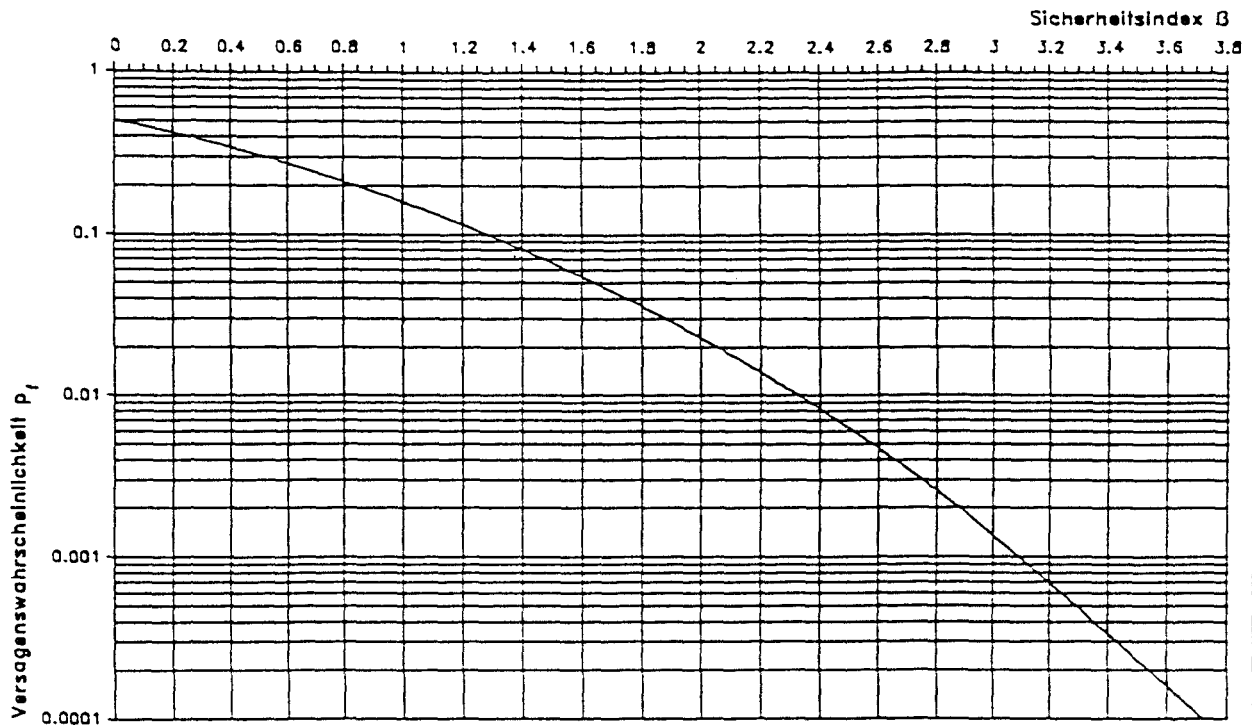
7 LITERATURHINWEISE

- / 1/ DIN 18230 - Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Ausgabe September 1987
- / 1a/ Beiblatt 1 zu DIN V 18230 Teil 1: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Ausgabe November 1989
- / 2/ Hosser, D.; Schneider, U.: Sicherheitsanforderungen für brandschutztechnische Nachweise von Stahlbetonbauteilen nach der Wärmebilanztheorie. VFDB 1 + 2, 1982
- / 3/ Hosser, D.: Statistisch-probabilistische Untersuchungen zur Ausfallhäufigkeit passiver Brandschutzeinrichtungen; Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Abschlußbericht zur Studie "Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken", Fachband 1, Teil C; Köln; September 1985
- / 4/ Hosser, D.; Schneider, U.: Zuverlässigkeit passiver Brandschutzmaßnahmen in Kernkraftwerken. VFDB 1, 1987
- / 5/ Ingenieurbüro Striewisch: Grundlagen zur Ermittlung der Ausfallhäufigkeiten von automatischen Brandmeldeanlagen und stationären Löschanlagen; Bericht im Auftrag der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH im Rahmen der Studie "Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken", Fachband 1, Teil B; Köln; September 1985
- / 6/ Sehrbrock, W.: Ermittlung der Zuverlässigkeit von Brandschutzeinrichtungen; Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Studie "Entwicklung und Verifizierung von Modellen zur Zuverlässigkeitsbewertung von Sicherheitseinrichtungen", Teilbericht - Entwurf, Köln, September 1990
- / 7/ Hosser, D.; Sprey, W.: A Probabilistic Method for Optimization of Fire Safety in Nuclear Power Plants; First International Symposium on Fire Safety Science, Gaithersburg M.D. (USA); Oktober 1985

- / 8/ Hosser, D.: Ein probabilistisches Modell zur Analyse der Brandausbreitung in Wohngebäuden; 7. Internationales Brandschutzseminar, Wien, September 1986
- / 9/ Hosser, D.: Sicherheitskonzept des Entwurfs DIN 18230. In: Baulicher Brandschutz, Bemessung im Industriebau. Institut für Bautechnik (Hrsg.), 1. Auflage, März 1979
- /10/ Bub, H. et al.: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. In: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH, 1979
- /11/ Henke, V.: Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" - Teilprojekt D 1. Arbeitsberichte 1975 - 1977. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1977
- /12/ Bub, H.; Hosser, D.; Kersken-Bradley, M.; Schneider, U.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz; Brandschutz im Bauwesen, Heft 4; Erich Schmidt Verlag, 1982
- /13/ CIB W 14: Design Guide Structural Fire Design. Fire Safety Journal Vol. 1072, 1986
- /14/ Hosser, D.; Schneider, U.: Vergleichende Sicherheitsbetrachtung zur brandschutztechnischen Bemessung unterschiedlicher Bauteile nach dem t_a -Verfahren (DIN 18230). Abschlußbericht im Auftrag des Instituts für Bautechnik, Braunschweig, Oktober 1988
- /15/ DIN 25424: Fehlerbaumanalyse; Ausgabe April 1990
- /16/ Gollwitzer, S.; Abdo; Rackwitz, R.: FORM - First Order Reliability Method, Manual; RCP GmbH; München; September 1988
- /17/ Gollwitzer, S.; Abdo; Rackwitz, R.: SYSREL / CUTALG - System Reliability / Cutalgorithm, Manual; RCP GmbH; München; Oktober 1989

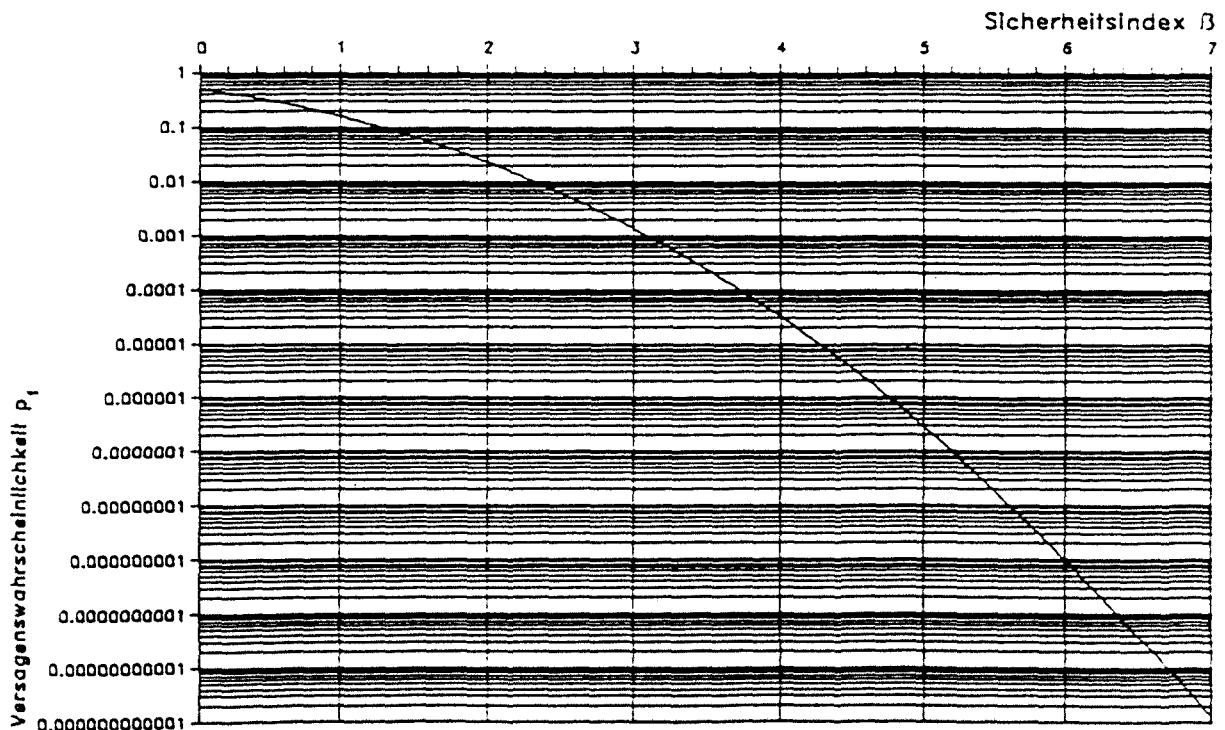
- /18/ Brenig. H. W., Riotte, H. G.: Statistische Auswertungen zur Brandeintrittshäufigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit aktiver Brandschutzmaßnahmen; Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Abschlußbericht zur Studie "Optimierung von Brandschutzmaßnahmen und Qualitätskontrollen in Kernkraftwerken", Fachband 1, Teil B; Köln, September 1985
- /19/ SIA - Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Brandrisikobewertung - Berechnungsverfahren; SIA-Dokumentation 81; Zürich; 1984
- /20/ DIN 4102 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Teil 2: Ausgabe September 1977
- /21/ DIN 18232: Rauch- und Wärmeabzugsanlagen; Ausgabe November 1989
- /22/ Feuerwehr-Dienstvorschrift 3: Die Staffel im Löschein-satz; Deutscher Gemeindeverlag GmbH; Köln
- /23/ Feuerwehr-Dienstvorschrift 4: Die Gruppe im Löschein-satz; Deutscher Gemeindeverlag GmbH; Köln
- /24/ Schubert, K.-H.: Problemanalyse zur Berechnung von Löschflächen unter Berücksichtigung der im Industriebau vor allem bei eingeschossigen Hallen anzutreffenden Gegebenheiten in Abhängigkeit der Kräfte und Mittel der Feuerwehren; Dissertation; Berlin; Juli 1979
- /25/ DVGW W 405: Technische Regeln Arbeitsblatt W 405, Bereitstellung von Löschwasser durch die öffentliche Trinkwasserversorgung; Zentralverlag für Gas und Wasser GmbH; Frankfurt; Juli 1978
- /26/ Scholz; Thomas: Niedersächsisches Brandschutzgesetz, Kommentar; Kommunale Schriften für Niedersachsen, 21; Deutscher Gemeindeverlag GmbH; Hannover; 1986
- /27/ DIN 14010: Angaben zur statistischen Erfassung von Bränden; Ausgabe September 1973

Darstellung : Sicherheitsindex β / Versagenswahrscheinlichkeit p_f



Beziehung zwischen dem Sicherheitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit p_f ($0 \leq \beta \leq 3,8$)

Darstellung : Sicherheitsindex β / Versagenswahrscheinlichkeit p_f



Beziehung zwischen dem Sicherheitsindex β und der Versagenswahrscheinlichkeit p_f ($0 \leq \beta \leq 7$)

